

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“DESARROLLO DE MATRICES PORCELÁNICAS HÍBRIDAS MEDIANTE LA  
INSERCIÓN DE CENIZA VOLANTE Y CHAMOTA COMO MATERIAS PRIMAS  
ALTERNAS”**

**POR:**

**ING. FRANK ERNESTO BASTIDA BERNAL**

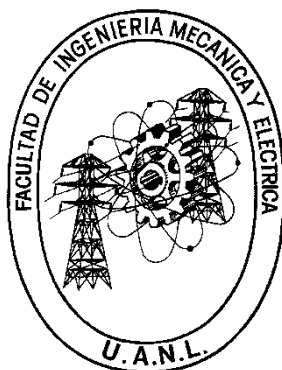
**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN  
MATERIALES**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN**

**JUNIO 2021**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“DESARROLLO DE MATRICES PORCELÁNICAS HÍBRIDAS MEDIANTE LA  
INSERCIÓN DE CENIZA VOLANTE Y CHAMOTA COMO MATERIAS PRIMAS  
ALTERNAS”**

**POR:**

**ING. FRANK ERNESTO BASTIDA BERNAL**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN  
MATERIALES**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN JUNIO 2021**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Subdirección de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "**Desarrollo de Matrices Porcelánicas Híbridas Mediante la Inserción de Ceniza Volante y Chamota como Materias Primas Alternas**", realizada por el alumno Frank Ernesto Bastida Bernal, con número de matrícula 2032347, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Tesis

Dr. Edén Amaral Rodríguez Castellanos  
Director

Dr. Jesús Fernando López Perales  
Co-Director

Dr. José Eulalio Contreras de León  
Revisor

Dra. María del Refugio Lara Banda  
Revisor

Vo. Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

147

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio de 2021



Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /  
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

## **Dedicatoria**

### **Dedicatoria**

#### **A mi familia:**

Mi madre Danny Bernal León, mi padre Francisco Andrés Bastida Garrido, mi hermano Leandro David Bastida Bernal, por el apoyo y la confianza que me han dado a lo largo de cada una de las etapas de mi vida y especialmente en esta etapa de finalización de mi Maestría a pesar de la distancia que nos separa. Agradezco infinitamente el siempre estar ahí para apoyarme, darme ánimo, por siempre confiar en mí, por demostrarme que puedo luchar por cumplir mis objetivos y que con esfuerzo y dedicación puedo lograr lo que me proponga.

## Agradecimientos

### Agradecimientos

Mis agradecimientos especiales a mi Asesor de tesis, Dr. Edén Amaral Rodríguez Castellanos por su asesoría, consejos y amistad. También a mi Co-asesor de tesis, Dr. Jesús Fernando López Perales, al Dr. José Eulalio Contreras de León y la Dra. María del Refugio Lara Banda por su apoyo metodológico y su guía en la realización del presente proyecto. A todo el grupo de investigación, gracias por su apoyo brindado, motivación y paciencia.

A Conacyt por el apoyo económico durante el periodo de maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), al posgrado en Ingeniería de Materiales, y a todos mis profesores por haberme formado académicamente y por la oportunidad de realizar mis estudios profesionales de posgrado.

Gracias a mis amigos, que me han animado, en especial a los del equipo de investigación, el M.C Leonel Díaz Tato, al Ing. Carlos Adrián Padilla Valdivia y al Dr. Jesús Fernando López Perales.

## Prólogo

En la actualidad, vivimos en una sociedad que demanda continuos cambios para satisfacer el ritmo de la vida. Las sociedades basadas en el conocimiento e innovación tecnológica presumen de un estándar de calidad de vida muy alta. Esta calidad de vida ha sido alcanzada gracias al constante desarrollo de nuevos materiales con propiedades destacables.

Como sociedad moderna, es indispensable contar con infraestructura eléctrica capaz de satisfacer los requerimientos de equipos para servicios médicos, alimenticios y de confort a todos los niveles. El acceso a esta necesidad es evidente para la comunidad en general; esto se traduce en una mayor demanda eléctrica y, por consiguiente, una lucha constante en la obtención de mejores productos que logren satisfacer las necesidades requeridas.

Es sobre este contexto que se hace crucial el desarrollo y estudio del mejoramiento en propiedades de los aisladores cerámicos para la industria de la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Actualmente, son fundamentales los aisladores de cerámica y en específico los de porcelana como aislantes de líneas de alta tensión, para la cual, el desempeño mecánico y eléctrico es muy importante. El procesamiento de la porcelana eléctrica con alta resistencia mecánica se ha convertido uno de los grandes desafíos con los que la ingeniería en materiales se enfrenta en la actualidad.

Por otra parte, el aumento en el nivel de la contaminación ambiental se ha convertido en uno de los riesgos a la salud con mayor alcance. La generación de subproductos y residuos de productos por el sector industrial mantienen una preocupación globalizada, ya que afecta de forma negativa al medio ambiente.

## Prólogo

La gran mayoría de estos desperdicios son depositados en rellenos sanitarios y/o confinados. El proceso de transporte y confinamiento genera un costo para la industria, aunado a la contaminación ambiental que se genera. Por tal motivo, el correcto manejo y aprovechamiento de los desperdicios se vuelve de gran importancia.

Las empresas cerámicas a sabiendas de la contaminación ambiental y la mancha voraz que estas provocan en todo el planeta están tratando en mayor o menor medida, de reciclar diversos residuos derivados de diferentes procesos productivos.

Una de las alternativas más atractivas es la incorporación de subproductos industriales a las composiciones de cuerpos cerámicos. Este tipo de prácticas tecnológicas, pero sobre todo de responsabilidad social implementadas a procesos industriales dan fortaleza a la infraestructura científica-tecnológica y medioambiental no solo del país sino del planeta.

Teniendo su fundamento desde el punto de vista científico-tecnológico por la compatibilidad química entre la ceniza volante, la chamota y la matriz porcelánica, surge la idea del presente proyecto de investigación.

Es en este contexto, lo que estimula el desarrollo de este trabajo de investigación, basado en el estudio de las modificaciones químicas y microestructurales de una matriz porcelánica triaxial, a través de la sustitución de cuarzo y feldespato por materias primas alternas (ceniza volante y chamota) en una porcelana tipo silicosa, con el objetivo de mejorar las propiedades físicas y mecánicas.

Me complace el interés mostrado por el estudiante Frank Ernesto Bastida Bernal para el desarrollo de este tipo de proyecto tecnológico mediante la investigación científica, cuyos resultados con seguridad contribuyen en la generación de conocimiento y en el desarrollo de la industria moderna en beneficio de la sociedad.

## **Prólogo**

Hoy, me siento sumamente orgulloso, satisfecho y alagado por la oportunidad de dirigir la tesis del estudiante Frank Ernesto Bastida Bernal, quien a lo largo de su desarrollo de proyecto de maestría pude percatarme de lo mucho que ha evolucionado y sin duda ha demostrado una gran capacidad profesional para desarrollar investigación y contribuir al desarrollo industrial del país. Al último, pero no menos importante quiero destacar la calidad humana inalcanzable de Bastida Bernal.

**Edén Amaral Rodríguez Castellanos**

Ciudad Universitaria

Junio 2021



## Índice

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>ii</b>
<b>Prólogo .....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice .....</b>	<b>vi</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>ix</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hipótesis .....	4
1.2 Objetivo general .....	4
1.3 Objetivos específicos .....	4
1.4 Justificación. ....	5
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>7</b>
<b>Revisión bibliográfica. ....</b>	<b>7</b>
2.1 Introducción. ....	7
2.2 Porcelana eléctrica triaxial .....	7
2.3 Clasificación de la porcelana triaxial eléctrica.....	8
2.4 Materias primas de las porcelanas triaxiales. ....	10
2.5 Microestructura de una porcelana triaxial .....	11
2.6 Propiedades de las porcelanas eléctricas.....	13
2.6.1 Propiedades mecánicas.....	15
2.6.2 Propiedades dieléctricas .....	16
2.7 Proceso de manufactura de materiales cerámicos .....	18
2.8 Proceso de elaboración de una porcelana triaxial .....	20
2.9 Preparación y mezclado de las materias primas .....	22
2.9.1 Filtrado con presión .....	23
2.9.2 Proceso de conformado y torneado.....	23
2.9.4 Proceso de secado. ....	24
2.9.5 Proceso de esmaltado .....	25
2.9.10 Proceso de sinterizado .....	26

# Índice

2.10 Antecedentes de la utilización de la ceniza volante y la chamota en la industria cerámica.....	27
2.11 Propiedades y estructura de la ceniza volante .....	31
2.11.1 Utilización de las cenizas volantes en la industria cerámica.....	34
2.12 Chamota .....	35
2.13 Conclusiones del capítulo .....	36
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>37</b>
<b>Metodología Experimental .....</b>	<b>37</b>
3.1 Introducción .....	37
3.2 Técnicas y equipos de caracterización .....	37
3.2.1 Caracterización de las materias primas mediante análisis químico (fluorescencia de rayos X).....	37
3.2.1.1 Análisis de la composición química de las materias primas .....	38
3.2.2 Caracterización de las materias primas mediante difracción de rayos X (DRX) .....	39
3.2.3 Microscopía electrónica de barrido .....	44
3.3 Diseño de experimentos .....	45
3.4 Elaboración de probetas experimentales.....	46
3.5 Propiedades físicas.....	49
3.5.1 Densidad, porosidad y porcentaje de absorción de agua .....	50
3.5.2 Propiedades mecánicas .....	52
3.5.2.1 Resistencia a la compresión en frío.....	52
3.5.2.2 Microdureza .....	54
3.6 Análisis microestructural (microscopía electrónica de barrido).....	55
3.7 Análisis mediante difracción de rayos X (DRX) .....	57
3.8 Conclusiones del capítulo .....	59
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>60</b>
<b>Análisis y Discusión de Resultados Experimentales .....</b>	<b>60</b>
4.1 Introducción .....	60
4.3 Evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas sinterizadas.....	65
4.3.1 Resistencia a la compresión en frío.....	65

# Índice

4.3.2 Microdureza .....	69
4.4 Difracción de rayos X (análisis de fases) de las probetas sinterizadas.....	73
4.5 Análisis microestructural y de fases de las probetas de porcelana eléctrica	75
4.6 Conclusiones del capítulo .....	85
<b>5.Conclusiones .....</b>	<b>86</b>
<b>6.Recomendaciones.....</b>	<b>87</b>
<b>7.Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>88</b>
<b>8. Índice de Figuras .....</b>	<b>95</b>
<b>9. Índice de Tablas.....</b>	<b>100</b>

## Resumen

## Resumen

En los últimos años se ha estudiado la reutilización de subproductos industriales en los productos cerámicos, algunos de estos son vidrio, chamotas, aisladores eléctricos en desuso, cenizas volantes, arena de fundición, escorias, entre otros. Actualmente, una gran parte de los estudios en el área de materiales cerámicos se ha centrado en el desarrollo y mejoramiento de materiales avanzados, olvidándose un poco de los materiales tradicionales y del uso de materias primas alternas como las antes mencionadas.

En este trabajo se estudia el desarrollo de una formulación de porcelana triaxial silicosa de grado eléctrico con características mecánicas y dieléctricas mejoradas mediante la incorporación de subproductos industriales (ceniza volante y chamota). Se estudió la influencia de la sustitución de las materias primas tradicionales por estos subproductos; es decir, cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y feldespato ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) por ceniza volante y chamota en las propiedades y microestructura de la porcelana triaxial. Para la experimentación se elaboraron 9 formulaciones experimentales a nivel laboratorio, utilizando el conformado por presión uniaxial. La primera formulación es denominada base o de control, la cual contiene la materia prima tradicional de una porcelana triaxial silicosa tipo eléctrica. Además, se elaboraron 4 formulaciones sustituyendo el cuarzo y feldespato por la ceniza volante y la chamota en 5, 8, 12 y 15 % en peso. Finalmente, en las otras 4 formulaciones restantes se fue sustituyendo únicamente el cuarzo por la ceniza volante y la chamota en 5, 8, 12 y 15 % en peso. Una vez realizado el conformado de las probetas en verde, estas fueron secadas a una temperatura de  $120^\circ\text{C}$  y posteriormente sinterizadas a una temperatura de  $1250^\circ\text{C}$ .

Las probetas sinterizadas fueron caracterizadas mediante evaluaciones físicas, que incluyen densidad, porosidad y absorción de humedad, además de análisis microestructurales y de fases a través de las técnicas de difracción de rayos X (DR-X) y microscopía electrónica de barrido (MEB), respectivamente. Se realizaron las

## Resumen

evaluaciones mecánicas por medio de ensayos de resistencia a la compresión en frío y microdureza de acuerdo con los estándares de la ASTM.

Los resultados obtenidos indican que la sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota impactan positivamente en el reforzamiento mecánico del sistema porcelánico triaxial tipo eléctrico estudiado, lo que representa una práctica factible para mejorar el desempeño de productos de porcelana reutilizando los residuos industriales, como es en el caso de aisladores eléctricos.

# Capítulo 1

## Introducción

En la actualidad, factores tales como requerimientos de mercado cada vez más demandantes, así como condiciones en el medio ambiente más severas, han derivado en el desarrollo de porcelana que exhiban un mayor desempeño y una elevada confiabilidad en la aplicación.

Por otra parte, el crecimiento de la población, la rápida urbanización, la industrialización, el aumento en el nivel de consumo de recursos naturales, la degradación de los recursos naturales y el cambio climático se han combinado para hacer que colapse el equilibrio natural. Si las prácticas actuales continúan y tanto el gobierno, como la sociedad, no proponen soluciones que mejoren los patrones actuales de producción y consumo, y si no utilizamos los recursos actuales de forma sostenible, entonces el estado del ambiente en el mundo continuará en caída libre.

Hoy en día, el aumento en el nivel de la contaminación ambiental se ha convertido en uno de los riesgos a la salud con mayor alcance. La generación de subproductos y residuos de productos por el sector industrial mantienen una preocupación globalizada, ya que afecta de forma negativa al medio ambiente. La generación de subproductos o residuos pueden ocurrir en cualquier etapa del ciclo de vida del producto. Como resultado a esto, se han lanzado innumerables políticas para impulsar el correcto manejo de residuos y subproductos.

La prevención de generación de residuos, tales como la promoción de sistemas de recuperación de recursos (la reutilización y el reciclaje de residuos) como medio de explotación de los recursos contenidos en los residuos no solo ayudan a proteger el medio ambiente, sino que, el uso de este tipo de residuos ofrece una

serie de ventajas, que entre otras destaca la reducción en el consumo de materias primas tradicionales, contribuyendo a la economía de los recursos naturales.

Actualmente, se ha estado trabajando con la reutilización de diversos residuos como son: vidrio, chamotas, aisladores eléctricos en desuso, cenizas volantes, arena de fundición, escorias, entre otros [1].

Es en este contexto, que sabemos hoy en día que la ceniza volante es un subproducto industrial que es considerado como un contaminante ambiental. La producción anual de subproductos generados de la quema de carbón a nivel mundial se estima alrededor de 600 millones de toneladas, de las cuales entre 75 y 80% son constituidos por ceniza volante (aproximadamente 500 millones de toneladas). Debido a los problemas ambientales generados por la disposición de este subproducto, se han realizado alrededor del mundo numerosas investigaciones sobre su utilización.

Así mismo, el seno de la industria cerámica no está exento de producir residuos industriales. En su sentido más burdo podemos describirlos como productos que provienen en su mayoría de materias primas explotadas; es decir de recursos naturales que son tratados a altas temperaturas y que bajo la inspección de los sistemas de calidad como producto terminado presentan un rechazo de aceptación. Estos residuos son desechos de la industria cerámica que ya fueron tratados a altas temperaturas (temperaturas mayores a los 900°C), los cuales son conocidos como “chamota” [2].

La gran mayoría de estos desperdicios son depositados en rellenos sanitarios y/o confinados. El proceso de transporte y confinamiento genera un costo para la industria, aunado a la contaminación ambiental que se genera. Por tal motivo, el correcto manejo y aprovechamiento de los desperdicios se vuelve de gran importancia. Muchas empresas cerámicas a sabiendas de la contaminación ambiental y la mancha voraz que estas provocan en todo el planeta están tratando

en mayor o menor medida, de reciclar diversos residuos derivados de diferentes procesos productivos.

Una de las alternativas más atractivas es la incorporación de subproductos industriales a las composiciones de cuerpos cerámicos. Este tipo de prácticas tecnológicas, pero sobre todo de responsabilidad social implementadas a procesos industriales dan fortaleza a la infraestructura científica-tecnológica y medioambiental no solo del país sino del planeta.

Por otra parte, para poder elaborar matrices porcelánicas, por lo general es necesario extraer de la corteza terrestre las materias primas. Esto sin duda alguna ha traído una creciente preocupación por la sobre explotación de los recursos naturales, lo cual representa un riesgo latente al medio ambiente. Aunado a esto, algunas materias primas utilizadas para la elaboración de porcelana son compartidas en la manufactura de otros productos, principalmente del sector cerámico; lo cual implica que la escasez de estas materias primas se verá reflejada en algunos años más.

A decir verdad, la industria de la porcelana, en su mayoría, hace uso de materiales que provienen de recursos naturales incorporando baja cantidad de materiales de reciclaje en su proceso productivo. Considerando lo anteriormente descrito, el presente proyecto nace de la idea de reemplazar materia prima tradicional por ceniza volante y “chamota” para el desarrollo de matrices porcelánicas híbridas sustentables de bajo impacto ambiental y con características equiparables a las ya existentes.

Esta idea está fundamentada desde el punto de vista científico-tecnológico por la compatibilidad química entre la ceniza volante, la chamota y la matriz porcelánica. Particularmente, este proyecto de investigación contempla la evaluación física y mecánica de las matrices porcelánicas híbridas, así como los rasgos microestructurales desarrollados. Para esto, se realizarán ensayos físicos para la



determinación de la densidad y porosidad; así mismo se llevarán a cabo pruebas mecánicas de compresión. Se contempla el análisis cristalográfico y microestructural.

## 1.1 Hipótesis

El resultado de las interacciones químicas originadas mediante la sustitución parcial de materia prima tradicional por materia prima alterna (ceniza volante y “chamota”) en matrices porcelánicas, permitirá el desarrollo de productos sustentables con propiedades físicas y mecánicas similares a las de una porcelana eléctrica convencional.

## 1.2 Objetivo general

Evaluar mediante el estudio físico y mecánico, la factibilidad de la sustitución parcial de materia prima tradicional por materia prima alterna (ceniza volante y “chamota”) en matrices porcelánicas para el desarrollo de una porcelana sustentable con propiedades similares a las porcelanas eléctricas convencionales.

## 1.3 Objetivos específicos

- Diseñar la formulación de referencia (porcelana eléctrica convencional).
- Diseñar formulaciones experimentales con sustitución de materia prima tradicional por materia prima alterna (ceniza volante y “chamota”).
- Establecer una metodología para la elaboración de probetas porcelánicas experimentales en verde.

- Determinar propiedades físicas (densidad, porosidad y absorción al agua) a las probetas sinterizadas a una temperatura de 1250°C.
- Determinar propiedades mecánicas mediante las pruebas de resistencia a compresión en frío (CCS) y microdureza en las muestras de porcelana eléctrica sinterizadas a 1250°C.
- Correlacionar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de porcelana eléctrica sinterizadas para determinar el porcentaje óptimo de sustitución de materia prima tradicional por materia prima alterna (ceniza volante y “chamota”).

### 1.4 Justificación.

La justificación de este proyecto de investigación se centra en la idea del desarrollo de productos sustentables de bajo impacto ambiental, al incorporar ceniza volante y “chamota” en matrices porcelánicas de grado eléctrico.

Hoy en día, se estima que solo el 16% de la producción total de ceniza volante se utiliza en otra industria (principalmente en la industria del cemento). El no aprovechamiento de este subproducto industrial repercute en costos de transportación y almacenaje, esto último causando contaminación ambiental. Así mismo, la generación de “chamota” es evidente en la industria cerámica y no se reporta claramente el uso de estas “chamotas” para la producción de porcelana.

El reciclaje es una práctica de suma importancia en la vida moderna con beneficios económicos, ambientales y tecnológicos que permite desarrollar nuevos productos con propiedades equiparables a los convencionales. En general, la industria de la porcelana, en su mayoría, hace uso de materiales que provienen de recursos naturales incorporando baja cantidad de materiales de desecho en su proceso productivo.

Por esta razón, el presente estudio se enfoca en la búsqueda del uso de la ceniza volante y “chamota” para el desarrollo de un material porcelánico sustentable y competitivo de bajo impacto ambiental. Con base en lo anteriormente mencionado, se manifiesta la importancia y justifica esta propuesta de proyecto.

Con este proyecto, se propone consolidar una nueva línea de investigación científica impulsada por la FIME-UANL dentro del Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Materiales en el campo de la sustentabilidad en materiales cerámicos y más específicamente en porcelanas, en donde se estudia el efecto de materias primas alternas en las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales de matrices porcelánicas convencionales del tipo eléctricas.

## Capítulo 2

### Revisión bibliográfica

#### 2.1 Introducción

En los inicios de la industria cerámica, la única materia prima de la cerámica era la arcilla plástica natural, casi excluida por la aparición de las llamadas cerámicas modernas que nacieron a principios del siglo XX.

Las cerámicas para aplicaciones eléctricas nacieron al mismo tiempo que el descubrimiento de la electricidad, debido a que los humanos se dieron cuenta que necesitaban transportar esta nueva fuente de energía, y de esta forma inventaron diferentes tipos de aislantes, muchos de los cuales son ampliamente utilizados en la actualidad.

El diseño meticuloso de tales productos aislantes requiere la ayuda de la ciencia de los materiales cerámicos, que es un campo muy amplio del conocimiento humano, y que se encuentra en constante desarrollo en el proceso de búsqueda de una mejor adaptación, convivencia y confort del ser humano con los fenómenos de su entorno [3].

#### 2.2 Porcelana eléctrica triaxial

La porcelana es una pasta de arcilla, cuarzo y feldespato, que debido a su temperatura de sinterización aproximadamente 1250°C, se obtiene una cerámica de uso eléctrico.

El cuerpo sinterizado suele estar compuesto por una matriz vítrea con cristales de cuarzo y de mulita embebidos en ella. La Fig. 1 muestra algunos tipos de aislantes eléctricos cerámicos [4].



**Fig.1.** Aisladores eléctricos cerámicos.

### 2.3 Clasificación de la porcelana triaxial eléctrica

Según la norma IEC 60672-1 “Ceramic and glass insulating materials – Part 1: Definitions and classification”, existen varios tipos de materiales aislantes, los cuales se dividen por grupos, el Grupo C es para materiales cerámicos.

En el grupo C se encuentra la pasta de porcelana de grado eléctrico, que es el tipo más utilizado para la fabricación de aislantes eléctricos, este grupo se clasifica como C1X0. Un grupo está relacionado con la composición de la porcelana triaxial tipo dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y se fabrica mediante moldeo por extrusión. Este grupo se denomina C110, y finalmente el grupo C120, que se caracteriza por la

composición de la porcelana triaxial tipo aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Este grupo se usa más comúnmente para fabricar porcelana de grado eléctrico.

La Tabla 1 describe a detalle la composición química y clasificación del grupo C1X0 utilizado para la fabricación de porcelana triaxial de grado eléctrico (aisladores eléctricos) [5].

**Tabla 1.** Composición y clasificación de las porcelanas eléctricas [6].

Subgrupo	Nombre	Composición química típica (% en peso)					
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}+\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$
<b>C110</b>	Porcelana silicosa, procesada plásticamente	68 – 72	20 – 24	< 1.0	< 0.5	< 1.2	4.0 – 5.5
<b>C111</b>	Porcelana silicosa prensada	68 – 72	20 – 24	< 1.0	< 0.5	< 1.2	4.0 – 5.5
<b>C112</b>	Porcelana base cristobalita, procesada plásticamente	65 – 70	24 – 28	< 1.0	< 1.0	< 1.2	3.5 – 4.5
<b>C120</b>	Porcelana aluminosa	48 – 55	40 – 47	< 1.0	< 1.2	< 1.2	3.0 – 4.0
<b>C130</b>	Porcelana aluminosa de alta resistencia mecánica	37 – 42	50 – 58	< 1.0	< 1.5	< 1.2	3.0 – 4.0

### 2.4 Materias primas de las porcelanas triaxiales

Las materias primas de la pasta de porcelana triaxial contienen óxidos como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Aunque estos son los óxidos principales, también existen otros óxidos de menor contenido, como  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ , etc.

Las materias primas que componen la porcelana triaxial arcilla-cuarzo-feldespato tienen funciones específicas en el proceso de fabricación del producto y el desempeño final de la matriz cerámica. A continuación, se presentarán las características de las materias primas que componen la porcelana de silicato de grado eléctrico:

La arcilla es un tipo de roca sedimentaria formada a partir de partículas muy finas ( $> 50\%$  es  $< 2\mu\text{m}$ ). Cuando se mezcla con agua, es plástica y se endurece con el secado y el calentamiento. Contiene filosilicato y otras propiedades con las mismas características. Los minerales (arcilla mineral) La arcilla tiene otros minerales diferentes a los anteriores, llamados minerales asociados (cuarzo, feldespato, calcita, pirita) y ciertas fases amorfas asociadas, que pueden o no impartir plasticidad. Cuando el contenido de carbonato es superior al 25% se denomina marga, que puede llegar a marga ( $\sim 50\%$  de carbonato), que también es materia prima para la cerámica. Del mismo modo, la arcilla diagenética compactada (pizarra) también se puede utilizar como materia prima. El origen de la arcilla puede ser de los océanos, lagos o continentes de cualquier época, aunque las principales materias primas se encuentran en tierras terciarias y cuaternarias, estas tierras no han sufrido metamorfismo y han mantenido mejor su plasticidad. La caolinita es la arcilla más utilizada para fabricar aislantes eléctricos de porcelana [5].

El feldespato es el principal compuesto responsable de formar una matriz vítrea formada por la combinación de silicato de aluminio y metal. En su valencia libre, se combina con Na, Ca y K, que a su vez actúa como un agente fundente para ayudar a formar la fase vítrea. El feldespato no es de naturaleza pura, existe en forma de

feldespato potásico ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) y calcio ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

El feldespato actúa como fundente promoviendo el proceso de sinterización vía fase líquida, en la confección de porcelanas.

El cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) es el material más conocido en la corteza terrestre, es un mineral que está compuesto por dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), éste cristaliza en un sistema trigonal (romboédrico). El cuarzo cuenta con un elevado punto de fusión, un coeficiente de dilatación muy pequeño y es estable químicamente debido a que es poco probable que sea atacado por los ácidos excepto el ácido fluorhídrico. También permite que otros compuestos pueden acoplarse obteniendo como resultado la unión de un material más resistente. El cuarzo disminuye la plasticidad del elemento porcelánico y su contracción en el proceso de secado, también controla la porosidad y aumenta la velocidad de secado de las piezas. Al adicionar mucho cuarzo, este tiende a provocar un aumento en el coeficiente de dilatación en los productos porosos después del proceso de cocido o sinterizado y a su vez disminuirlo en los productos vitrificados [5].

### 2.5 Microestructura de una porcelana triaxial

El fenómeno de difusión, en sus variadas modalidades, es muy importante en la dinámica de la cocción cerámica. Como la difusión viene establecida por la temperatura y el tiempo, es fácil asumir que el avance de las reacciones cerámicas y la formación de la microestructura dependen de estos parámetros. El proceso de sinterizado se realiza posteriormente al proceso de secado de las piezas, en la sinterización de las muestras ocurren las transformaciones más importantes de los materiales.



La primera transformación es la deshidroxilación del caolín, esto ocurre a temperaturas entre 500 y 600°C dando lugar a la formación de metacaolín ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). Entre 600 y 950°C no ocurren grandes variaciones en esta fase.

En el intervalo de temperatura de 700 -1000°C, se origina la transformación en la fase del feldespato, esto se produce al reaccionar entre si las especies sódica y potásica, formando la sanidina. El potasio empieza a difundirse en la arcilla y simultáneamente comienza la formación de la mulita. Mientras tanto, la sanidina comienza a fundirse, obteniéndose una fase vítrea.

A medida que la temperatura aumenta y la viscosidad del medio disminuye la difusión y la sinterización se van acelerando, entre los 1000 -1050°C, empieza la formalización de la fase mulita con cierta velocidad.

Simultáneamente se originan los fenómenos de difusión iónica formándose cristales de geometría aciculares de la fase mulita en los granos de feldespato, que se acomodan de forma más o menos radial hacia el interior de estos.

A 1200°C, la fase mulita ya se formó totalmente en la matriz arcillosa y en la matriz feldespática.

A temperaturas por debajo de los 1200°C, la fase cuarzo permanece usualmente inactiva, porque a estas temperaturas, el cuarzo muestra escasa reactividad en este medio. Alcanzando casi los 1200°C de temperatura, empieza a ocurrir la disolución del cuarzo en el vidrio con cierta velocidad, si fuera suficiente la cantidad para saturar la masa fundida, finalizaría la disolución del cuarzo y empezaría a formarse cristobalita [7].

### 2.6 Propiedades de las porcelanas eléctricas

Los aislantes eléctricos de porcelana ya sean de baja o alta tensión, deben cumplir determinadas propiedades mecánicas y eléctricas, porque estas propiedades les permiten funcionar correctamente. La tabla 2 muestra el comportamiento general de las porcelanas eléctricas.

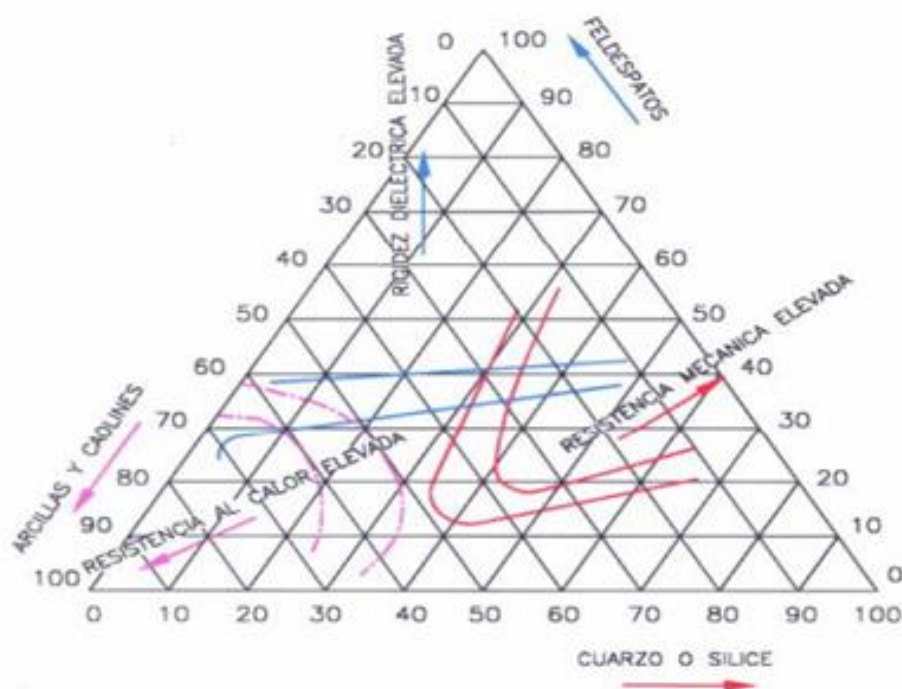
Los atributos más importantes son los siguientes:

- Deben de ser completamente vitreos para evitar que absorba agua de la atmósfera. Los aisladores de baja tensión pueden tener una tasa de absorción de hasta el 0.5 % agua, mientras que para los de alta tensión la tasa de absorción debe de ser nula.
- Debido a la tensión de tracción y la carga que deben soportar, presentan una alta resistencia mecánica.
- La porcelana eléctrica debe tener una constante dieléctrica baja (capacidad de almacenamiento); rigidez dieléctrica de alta resistencia a la ruptura (capacidad para soportar alto voltaje); resistividad volumétrica alta (resistencia por unidad de volumen). Para aisladores cerámicos, la resistividad volumétrica debe ser superior a  $10^6 \Omega / \text{cm}^3$  [5].

Las porcelanas eléctricas compuestas por arcilla, cuarzo y feldespato desarrollan sus propiedades útiles al sinterizarse a temperaturas del orden de  $1400^\circ\text{C}$ , hasta lograr un alto grado de vitrificación. Cada una de las materias primas le proporciona a la porcelana eléctrica una determinada propiedad, como se muestra en la Fig. 2 [5].

**Tabla 2.** Propiedades generales de la porcelana eléctrica [5].

Propiedades	Valor
Densidad relativa	1.90-2.48
Absorción de agua (%)	0.2-2.0
Conductividad térmica (W/m.K)	0.0020-0.0039
Resistencia a la tracción (lb/pulg <sup>2</sup> )	1500-6000
Resistencia a la compresión (lb/pulg <sup>2</sup> )	30000-60000
Resistencia al choque térmico (°C)	370-840
Rigidez y dieléctrica (V/mm)	3540-7870
Resistividad volumétrica ( $\Omega/\text{cm}^3$ )	$1.8-18 \times 10^{10}$
Constante dieléctrica (adimensional)	6.0-7.5



**Fig. 2.** Propiedades de la porcelana en función de las materias primas [5].

### 2.6.1 Propiedades mecánicas

En el reforzamiento de la resistencia mecánica de las porcelanas se plantearon tres teorías con el fin de esclarecer a que se le atribuye el aumento en la resistencia mecánica de las porcelanas triaxiales.

Teorías de reforzamiento de la resistencia mecánica en las porcelanas triaxiales:

- Esto indica que la razón de la mejora mecánica se debe al entrecruzamiento de las agujas finas de mulita. También se confirmó que la resistencia mecánica aumentó con el aumento de la formación de mulita en la microestructura. La mulita secundaria tiene forma de agujas aciculares, lo que añade más resistencia mecánica que la mulita primaria [12-13].
- Otra teoría es la hipótesis de reforzamiento de la matriz, la cual plantea que se generarán esfuerzos de compresión en la fase vítrea durante el proceso de sinterización, debido a la diferencia en el coeficiente de expansión térmica entre la matriz amorfa o vítrea, lo que aumenta la resistencia mecánica [13-14].
- Como última teoría está la hipótesis de reforzamiento por dispersión de partículas. Esta hipótesis plantea que durante la propagación de las grietas interfieren las partículas dispersadas en la matriz vítrea, esto ocasiona un aumento de la energía de fractura y en la resistencia mecánica [5].

En la tabla 3 se observan los valores de resistencia mecánica para las materias porcelanas triaxiales de grado eléctricas, las cuales pertenecen al grupo C de materiales aislantes [5].

**Tabla 3.** Valores de resistencia mecánica para porcelana triaxial de grado eléctrica [5].

Subgrupo	Nombre	Resistencia mecánica a la flexión (MPa)	
		Sin esmalte	Con esmalte
<b>C110</b>	Porcelana silicosa, procesada plásticamente	50	60
<b>C111</b>	Porcelana silicosa prensada	40	NR
<b>C112</b>	Porcelana base cristobalita, procesada plásticamente	80	100
<b>C120</b>	Porcelana aluminosa	90	110
<b>C130</b>	Porcelana aluminosa de alta resistencia mecánica	140	160

### 2.6.2 Propiedades dieléctricas

Una de las principales aplicaciones de los materiales cerámicos es el aislamiento eléctrico, ya que, debido a su configuración atómica, no hay mucho espacio para que los electrones se muevan. Este comportamiento se debe a que el material cerámico tiene un enlace iónico, el cual está en equilibrio y requiere una gran cantidad de electrones de valencia para ingresar a la banda de conducción. En algunos casos, el material cerámico se dopa para convertirlo en un semiconductor.

Una característica importante de la porcelana eléctrica es que no conduce electricidad, lo que se logra mediante enlaces químicos iónicos y covalentes, que limitan el movimiento de los electrones. Las características de la porcelana eléctrica y la resistencia mecánica lo hacen útil para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, como soporte de cables.

Para aplicaciones de aislamiento eléctrico, se deben considerar materiales con altos valores de resistividad porque pueden limitar el flujo de corriente a través del aislante. La rigidez dieléctrica del aislante es importante porque define la máxima diferencia de potencial que el material puede soportar sin que ocurra una descarga, por lo que se espera que este valor sea mayor para evitar fallas graves del aislante.

Las fases presentes en la microestructura son un factor importante en el valor de la rigidez dieléctrica. La fase cristalina y la porosidad de la porcelana presentan una alta resistividad, mientras que la conducción se realiza principalmente en la fase vítrea/amorfa, que es la conducción de iones. Las propiedades dieléctricas de la porcelana dependen en gran medida de la naturaleza y concentración de los iones de metales alcalinotérreos que forman el vidrio [6].

En la tabla 4 se presentan los valores dieléctricos característicos para los diferentes tipos de porcelana de grado eléctrico.

**Tabla 4.** Valores dieléctricos característicos para los diferentes tipos de porcelana de grado eléctrico [6].

Subgrupo	Nombre	Resistividad (Wm)	Rigidez dieléctrica <sup>1</sup>	Factor de potencia	Permitividad relativa
			(kV/mm)		
<b>C110</b>	Porcelana silicosa, procesada plásticamente	$10^{11}$	20	0.025	6-7
<b>C111</b>	Porcelana silicosa prensada	$10^{10}$	NR	NR	NR
<b>C112</b>	Porcelana base cristobalita, procesada plásticamente	$10^{11}$	20	0.025	5-6
<b>C120</b>	Porcelana aluminosa	$10^{11}$	20	0.025	6-7
<b>C130</b>	Porcelana aluminosa de alta resistencia mecánica	$10^{11}$	20	0.03	6-7.5

## 2.7 Proceso de manufactura de materiales cerámicos

La manufactura de productos cerámicos se realiza haciendo uso de diversos tipos de hornos, con una amplia gama de materias primas y en numerosas formas, tamaños y colores. La metodología para la fabricación de productos cerámicos es bastante uniforme.

Es recurrente en la fabricación de azulejos y baldosas, cerámica doméstica, sanitarios y también cerámicas técnicas, la utilización de un proceso de sinterización de múltiples etapas.

Las materias primas se almacenan en lugares abiertos, en cajas, en alimentadores de gran volumen, silos de templado, silos de envejecimiento, silos amargos o silos secos.

Los silos están equipados con indicadores de nivel, válvulas de sobrecarga y filtros o unidades de desplazamiento de gas, donde se expulsa el aire polvoriento desplazado. Algunos materiales también se entregan en forma líquida o en suspensión y, por lo tanto, se almacenan en tanques u otros recipientes [11-15].

En su esencia, las materias primas cerámicas se mezclan para alcanzar una buena homogeneidad, regularmente el producto cerámico se conforma a través de prensado o extrusión sin estar supeditados solamente a estos dos tipos de conformado; es decir pueden ser vaciados, vaciado por cinta, inyectado, entre otros, y finalmente, se tratan térmicamente mediante el proceso de sinterización.

El agua es regularmente usada en el proceso de mezclado, y ésta se evapora en la etapa de secado por lo regular a 120°C al ser sometidos a hornos, los cuales son operados periódicamente o hornos de funcionamiento continuo. En la mayoría de los casos, los hornos se calientan con gas natural, combustible, carbón, coque de petróleo, biogás / biomasa o electricidad.

Durante el tratamiento térmico, se alcanza una estructura cerámica irreversible, esto exige un gradiente de temperatura muy preciso durante la sinterización para garantizar que los productos obtengan el tratamiento adecuado. Posteriormente, es necesario un enfriamiento controlado, para que los productos liberen su calor gradualmente y conserven su estructura cerámica. Entonces los productos son embalados y almacenados para su entrega [11].



### 2.8 Proceso de elaboración de una porcelana triaxial

La tecnología cerámica ha ido evolucionando, desde la época en que todo dependía de las materias primas disponibles en yacimientos hasta la forma actual en que interviene la síntesis de nuevos materiales cerámicos, es decir que ya casi no se usan los minerales tal cual son extraídos sino conlleva una serie de procesos de modificación de características.

Por lo general, éstos son sometidos a tratamientos de concentración y purificación para poder establecer las especificaciones lo más precisas posible sobre la calidad y que permitan caracterizar, perfectamente, la materia prima en especial con respecto a composición química, mineralógica (componentes principales e impurezas), distribución granulométrica, características fisicoquímicas, entre otras [12].

En el caso de una porcelana de grado eléctrico, el proceso puede ser mediante técnicas convencionales de conformado, como la extrusión o el vaciado, o bien técnicas un poco más sofisticadas como el prensado isostático [6].

En la Fig. 3 se muestra el diagrama del proceso de manufactura de aisladores eléctricos porcelánicos vía proceso de extrusión.



**Fig. 3.** Diagrama del proceso de manufactura de aisladores eléctricos de porcelana [12].

### 2.9 Preparación y mezclado de las materias primas

Las materias primas se deben mezclar con agua (ver Fig. 4), conformando una mezcla de consistencia cremosa denominada "barbotina". Logrando así una completa homogeneidad que permita la mezcla íntima de los materiales constituidos. Los posibles aglomerados de partículas se desintegran con la ayuda de dispersores de alta velocidad.

El proceso de preparación de la mezcla de los materiales por vía húmeda es denominado porcelana por proceso húmedo y es exigido en las normas ANSI C29.1 a C29.9, con el propósito de asegurar la calidad y homogeneidad de producto final [5-6].



**Fig. 4.** Mezclador de polvos cerámicos.

### 2.9.1 Filtrado con presión

Una vez obtenida la mezcla o barbotina, se procesa a través de tamices y separador magnético, con el fin de remover partículas gruesas y materiales ferrosos; esta mezcla se bombea por un filtro prensa (ver Fig. 5) para reducir el contenido de agua del 50% al 22% aproximadamente y conformar una masa plástica llamada galleta [5].



**Fig. 5.** Filtros-prensa en la industria cerámica.

### 2.9.2 Proceso de conformado y torneado

Este proceso consiste en obtener una pieza cilíndrica de la masa plástica de porcelana mediante la técnica de extrusión, posteriormente la mezcla es colada en un equipo para ser torneado, de esta obtener la geometría final del aislador eléctrico. Existen otras técnicas que se pueden utilizar para el conformado de las piezas de porcelana triaxial de grado eléctrico como son : el prensado uniaxial en seco (ver Fig. 6), prensado en caliente, prensado isostático, vaciado y torneado en seco o en húmedo [5].



**Fig. 6.** Prensa hidráulica uniaxial para conformar probetas cerámicas escala laboratorio.

### 2.9.4 Proceso de secado

El secado de las piezas cerámicas conformadas se efectúa mediante convección de aire caliente. El tiempo de secado de una pieza viene determinado por la cinética del proceso de secado, el cual depende directamente del modo en que se elimina el agua de la pieza.

El funcionamiento del proceso de secado es el siguiente, la pasta cerámica se compone de partículas de arcilla divididas por películas de agua que, al ser eliminadas por evaporación, permiten el desplazamiento de las partículas. Conforme la pasta pierde más humedad, estas partículas se aproximan más entre ellas ocasionando que la arcilla se contraiga hasta que la película de agua quede completamente eliminada y las partículas ya no pueden acercarse más.

Por lo anteriormente mencionado, al secar una pieza, el volumen de la pasta cerámica disminuye proporcionalmente a la cantidad de agua eliminada, y con la eliminación de agua se forman huecos en su estructura (que son ocupados por las partículas de arcilla) y la pieza se contrae constantemente hasta que se ha eliminado toda el agua.

Los efectos de la eliminación de agua son además de la pérdida de volumen y agua de las piezas por la evaporación del agua, un cambio en el color de la pasta, mayor rigidez y un incremento en su resistencia mecánica [6].

### 2.9.5 Proceso de esmaltado

Este es uno de los procesos tecnológicos más importante, debido a que le proporciona la estética final del aislador eléctrico de porcelana [13].

Para lograr el esmaltado de las piezas de porcelana, se pueden utilizar varios métodos, entre los que se encuentran las técnicas de inmersión y atomizado con aire ("spray"). La técnica de esmaltado por inmersión consiste en sumergir la porcelana en un líquido espeso, el cual contiene prácticamente los mismos materiales de la composición de una pasta de porcelánica, se le adicionan carbonatos o talco, con el objetivo de disminuir su punto de fusión. Es decir, el esmalte cerámico es una capa delgada de vidrio que se adhiere a la superficie de la porcelana, esta capa de vidrio le aporta al producto sinterizado un aumento de la resistencia mecánica hasta un 25%, resistencia a la tracción y a la flexión, impermeabilidad, facilidad de limpieza, brillo, color, y textura superficial.

El esmaltado no tiene influencia sobre las propiedades dieléctricas, pero permite la auto limpieza del aislador [5-6].

### 2.9.10 Proceso de sinterizado

En el proceso de sinterización se generan puentes de unión mediante difusión de átomos entre las partículas de polvo, la unión entre las partículas se acelera si se incrementa la temperatura y el contacto entre las mismas. La temperatura habitual en sinterizado es del orden del 70-80% de la  $T_m$  (temperatura de fusión).

Para evitar la oxidación de las piezas, el proceso de sinterizado se realiza en una atmósfera controlada habitualmente reductora de hidrógeno, monóxido de carbono o amoníaco.

Durante el proceso de difusión en estado sólido se produce una contracción en la pieza que se suele tener en cuenta para su compensación.

El sinterizado se puede llevar a cabo en hornos industriales, tipo túnel o discontinuo donde se va a obtener el acabado superficial requerido del elemento porcelánico. En la Fig. 7 se muestra un esquema del proceso de sinterizado [5-19].

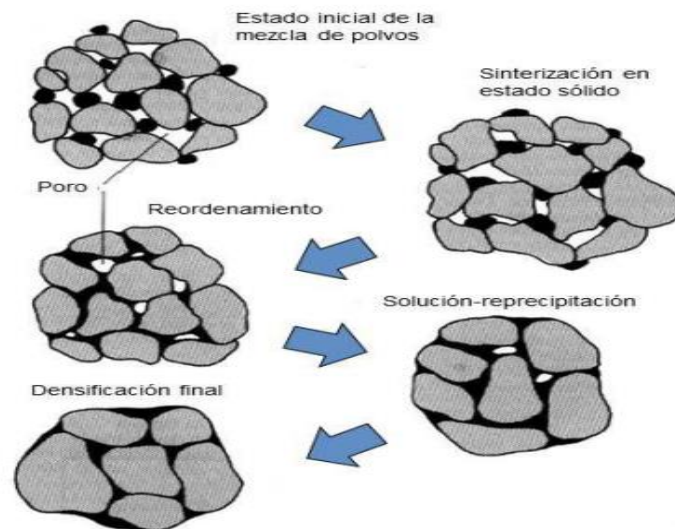


Fig. 7. Proceso de sinterizado [6].

### 2.10 Antecedentes de la utilización de la ceniza volante y la chamota en la industria cerámica.

En la industria de la porcelana triaxial se producen desechos, los cuales se han utilizados en distintas aplicaciones dentro de la clasificación de materiales cerámicos, tales como la adición de porcelanas eléctricas en estructuras de concretos.

Portland. K. F. Portella y colaboradores en el 2006 plantearon agregar residuos de porcelana eléctrica en un sistema cerámico, específicamente en concreto base Portland. Mediante la utilización de este agregado (porcelana eléctrica), el sistema que obtuvieron presentó buenos resultados en sus propiedades mecánicas. Como resultado plantearon que la utilización del material obtenido a partir del agregado cerámico de desecho (porcelana eléctrica) puede ser utilizado de manera confiable, siempre y cuando la estructura que se desee diseñar no presente dificultades dimensionales, ya que la adición de este desecho deriva problemas de expansión en el material [15].

En el 2015 Shujing Li y colaboradores realizaron el estudio de preparación de un cerámico poroso agregándole desechos de aisladores eléctricos con altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 70.09 y 24.37 % en peso respectivamente. Analizaron varias temperaturas de sinterización y contenidos de adición de desechos (mezcla de arcilla y ceniza volante). Sus análisis se basaron en el estudio de las propiedades físicas como; densidad, porosidad aparente y pruebas mecánicas de Cold Crushing Strength (CCS) o pruebas de compresión en frío. A través de su estudio determinaron que era posible la fabricación de un cerámico poroso de bajo costo con alta resistencia mecánica y baja conductividad térmica, agregando los desechos de los aisladores eléctricos. Determinaron que con una temperatura de sinterización de  $1200^\circ\text{C}$  y un 60% de adición de desecho en peso obtendrían los mejores resultados [16].



Swapan Kumar Das y colaboradores en el 2003 reemplazaron el cuarzo progresivamente por 5, 10 y 15% en peso de cenizas volantes en una composición de porcelana triaxial tradicional que consiste en arcilla caolinítica, cuarzo y feldespato. Los efectos de la sustitución a un rango de temperatura de 1150–1300°C se investigaron evaluando la contracción lineal, la densidad aparente, la porosidad y la resistencia a la flexión. La estimación cuantitativa del contenido de mulita y cuarzo residual se realizó mediante DRX y se estudiaron las microestructuras de algunas muestras seleccionadas usando SEM. Los resultados mostraron que las muestras que contenían cenizas volantes alcanzaron densidades más altas ( $2.46 \text{ g/cm}^3$ ) en todo el rango de temperatura (1150–1300°C). La sustitución del cuarzo por cenizas volantes aumenta la contracción lineal, la densidad aparente y disminuye la porosidad aparente en todo el rango de temperatura de calentamiento (1150–1300°C). Esto puede deberse a la formación de vidrio de baja viscosidad que fluye fácilmente y ayuda a una mejor sinterización en fase líquida. La resistencia máxima a la flexión (70.5 MPa) se obtuvo a 1300°C en la muestra que contiene 15% en peso de cenizas volantes en comparación con (61.1 MPa) obtenida en la muestra de porcelana tradicional. Los estudios de DRX revelan una mayor mulitización en las muestras que contienen cenizas volantes. Microestructuralmente, a 1300°C muestran la presencia de granos de cuarzo y agujas de mulitas secundarias incrustadas en una matriz vítrea feldespática. Los granos de cuarzo (25–50 mm) están asociados con grietas circunferenciales a su alrededor [17].

En el año 2018 Samuel Huaquisto Cáceres y colaboradores utilizaron ceniza volante como adición al cemento para la fabricación del concreto de las diferentes obras civiles. El material y método que emplearon fue concreto normal, donde agregaron la ceniza volante en un 2.5%, 5.0%, 10.0% y 15.0% para la realización de ensayos de ruptura en 7, 14, 28 y 90 días. Obtuvieron resultados a los 28 días, el cual indicó una resistencia promedio de  $221 \text{ kg/cm}^2$  para concreto normal, para concreto con adición 2.5% de ceniza volante  $223 \text{ kg/cm}^2$ , con adición del 5.0%  $231 \text{ kg/cm}^2$ , para el 10.0% de adición de ceniza volante  $200 \text{ kg/cm}^2$  y  $192 \text{ kg/cm}^2$  para

el 15% de adición ceniza volante respectivamente. Llegaron a la conclusión que se debe utilizar un rango menor al 10% de adición de la ceniza volante como sustitución al cemento [18].

Karol Lizeth Roa-Bohórquez y colaboradores en 2018 adicionaron ceniza volante para refuerzo de la matriz de unidades cerámicas macizas. Utilizaron una mezcla adicionando 80% arcilla y 20% de ceniza volante de esta forma determinar las influencias que puede provocar de la adición del  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , también elaboraron unidades cerámicas mezclando 80% arcilla, 15% de cenizas volantes y 5% de sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) para inducir las eflorescencias. Realizaron la sinterización de las piezas utilizando una curva de cocción a una velocidad de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  hasta alcanzar los  $400^\circ\text{C}$ , donde mantuvieron esa temperatura durante 2 horas; se elevó la temperatura a  $950^\circ\text{C}$ . Una vez transcurrido este tiempo y se mantuvo a  $950^\circ\text{C}$  por tres horas más. Las muestras que presentaban adición de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , presentaron un alto contenido de sales en su matriz, las cuales no afectaron la resistencia a la deformación ante el esfuerzo de compresión, debido a que cuatro de las cinco probetas superaron la mínima resistencia exigida por la norma [19].

María Lidón Bou Cortés y colaboradores en 2010 realizaron en método de obtención de un producto de cerámico a partir de cenizas volantes. Utilizaron un 50% en peso o igual o inferior al 75% en volumen del producto final debido a que la arcilla de partida no contenía carbonatos o su plasticidad era desfavorable para procesos conocidos de fabricación de materiales cerámicos como es la extrusión. Obtuvieron como resultado con la aplicación de la ceniza volante y los aditivos utilizados para la obtención del producto de arcilla, tuvo un efecto positivo en términos de plasticidad y endurecimiento del material cerámico en su proceso de fabricación, concretamente durante el secado. Los materiales cerámicos secos presentaron un 25% más de resistencia a la fractura [20].

Iglesias, I.; Acosta, A y colaboradores en 2015 realizaron el estudio de las propiedades cerámicas de arcillas comunes por adición de ceniza volante GICC (Gasificación Integrada en Ciclo Combinado). Debido a que la ceniza volante tipo GICC cuenta con un tamaño de partícula menor a las 100  $\mu\text{m}$ , esto permite un buen comportamiento en los materiales cerámicos prensados. A su vez, plantearon estudiar los cuerpos cerámicos por extrusión. Se prepararon las probetas mezclando arcillas industriales con y sin agregar ceniza volante tipo GICC. Se elaboraron las pastas cerámicas M y M-CV utilizando polvo arcilloso molido con un tamaño de partícula menor a las 100  $\mu\text{m}$ , para realizar la mezcla M-CV, se mezcló ceniza volante con polvo de arcilla en seco. Las formulaciones del material se realizaron mediante mezclando arcillas como muestra de referencia (M) y se adicionó el 10 % de ceniza volante tipo GICC (M-CV) en peso, lo cual es una cantidad factible desde el punto de vista industrial. Se mejoraron las propiedades físicas, donde se aumentó la resistencia mecánica, tanto en verde y en cocido, también hubo una reducción de la absorción de agua y del coeficiente de saturación en el producto final sin deformarse las piezas y sin ninguna variación característica de color [20].

Jorge Sánchez-Molina y colaboradores en el 2019 sustituyeron parcialmente material arcilloso utilizando ceniza volante de una central termoeléctrica para elaborar materiales cerámicos de construcción. Las formulaciones de las probetas se realizaron sustituyendo 5, 10, 15 y 20% en peso, utilizando la técnica de conformado por extrusión, las temperaturas de cocción empleadas fueron de 900 a 1200°C para así establecer correlaciones microestructurales. Con el análisis microestructural se demostró que la ceniza volante es rica en fase amorfa y cuenta con elementos de carácter fundente tales como K y Fe. Se mostraron fenómenos de recristalización de sílice y un aumento de porosidad en el estudio de este proyecto. Con la realización de la técnica DRX se evidenció que a diferencia del material de referencia (MA100), adicionando ceniza volante esta hace que el proceso de recristalización de fases se acelere por encima de los 1100°C,

beneficiando que ocurra la formación de cuarzo y cristobalita en vez de fase vítrea [18].

### 2.11 Propiedades y estructura de la ceniza volante

La ceniza volante proviene de los carbones que se queman en las centrales térmicas, las cuales son las principales fuentes productoras de ceniza volante, contienen una cantidad variable de materia no carbonosa (cenizas), que pueden ir desde un 5 hasta más de un 50%. El contenido de carbono (C) de la ceniza volante depende generalmente de la eficiencia de la tecnología de combustión de cada central térmica [21].

Existen dos tipos principales de cenizas volantes según la norma de ASTM C618 (American Society for Testing and Materials):

Ceniza volante tipo C: Las cenizas volantes que están en este grupo presentan propiedades cementicias y puzolánicas, obtenidas de lignitos y carbones subbituminosos, y que deben tener un contenido mínimo de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  del 50% y un máximo en cal (CaO) del 20% para poder ser empleadas en hormigones [14].

Ceniza volante tipo F: Este tipo de cenizas volantes normalmente son obtenidas en la combustión de antracitas y carbones bituminosos, éstas presentan un contenido mínimo de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  del 70% en peso y también presentan propiedades puzolánicas [14].

**Tabla 5.** Especificaciones de las cenizas volantes según la norma ASTM C168 [19].

	Clase C	Clase F
<b>SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	> 50%	> 70%
<b>CaO</b>	> 10%	< 10%
<b>SiO<sub>3</sub></b>	< 5%	< 5%
<b>Álcalis disponibles como NaO<sub>2</sub></b>	< 1,5%	< 1,5 %
<b>Perdida a la incineración (LOI)</b>	< 6%	< 6%
<b>Humedad</b>	< 3%	< 3%

Las cenizas volantes están constituidas fundamentalmente por partículas vítreas, esféricas o redondeadas, de granulometría muy fina y con composición químicas muy similar a la de la materia mineral del carbón de la que procede. Sus componentes principales son sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y cal (CaO), en diferentes proporciones según su origen. También se encuentran en la ceniza partículas irregulares y angulosas, tanto de minerales como partículas de carbón inquemado (coque) [14].

Los minerales más importantes encontrados en las cenizas volantes como inclusiones dentro de la fase vítrea o depositados en la superficie de las partículas son: mulita, magnetita, sílice, hematites, aluminatos cálcicos, anhidrita y óxido de calcio libre [27].

La composición química de las cenizas volantes varía según el carbón de procedencia. Las obtenidas al quemar muestran una composición aproximada de 50% de sílice, 30% de alúmina, 7% de óxido de hierro, 2% de cal y entre 26% de inquemados. Las cenizas volantes procedentes de lignitos pueden tener altos o bajos contenidos de cal. por ejemplo la composición de las cenizas ricas en cal varia dentro de los siguientes límites: 23-50% SiO<sub>2</sub>, 8-14% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8-20% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 18-50% de CaO [21].

Las cenizas volantes secas se suelen presentar como un polvo muy fino y suave al tacto, cuyo color depende de contenido de óxido de hierro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y de su riqueza en carbón sin quemar [27].

Las características físicas y propiedades dependen de múltiples factores como son: la composición química de los componentes incombustibles del carbón, el grado de pulverización de este, el tipo de caldera, la temperatura de combustión, el tipo de extractor, el sistema por el cual las cenizas son retiradas de la central térmica.

De esta manera se pueden distinguir 3 grupos básicos de cenizas volantes [22]:

- 1- Las cenizas convencionales procedentes de central térmica.
- 2- Las cenizas obtenidas en centrales de lecho fluido.
- 3- Las cenizas procedentes de centrales con planta de desulfuración.

La finura media de las cenizas volantes brutas (sin moler) es comparable a la del cemento Portland ordinario y su tamaño de grano oscila entre 0.2 y 200 micras de diámetro, llegando en casos excepcionales a valores de hasta 500 micras. La densidad de conjuntos aproximadamente  $0.89 \text{ g/cm}^3$  y el peso específico de las partículas oscila entre 2.0 y  $2.9 \text{ g/cm}^3$  [28].

La densidad aparente de las partículas de cenizas volantes varía, entre 1.88 y  $2.84 \text{ g/cm}^3$ . La densidad de las cenizas volantes aumenta cuando se somete a un molido y se ha encontrado que para una ceniza con una densidad inicial de  $1.82 \text{ g/cm}^3$  después de una molida es de  $2.70 \text{ g/cm}^3$ .

Las densidades son distintas debido a la cantidad presente de cenosferas huecas o macizas en las cenizas, de modo que, las cenizas menos densas son los de mayor proporción de partículas huecas [3].

### 2.11.1 Utilización de las cenizas volantes en la industria cerámica

Los residuos de combustión del carbón contienen más del 70% de material sílico-aluminosos vítreo, lo cual hace posible que sean utilizados como materia prima para rellenos inertes y funcionales, absorbentes, inmovilizadores, y materiales de construcción de alto valor. Mientras que los componentes indeseables como los metales pesados están presentes tan sólo como trazas, con excepciones muy puntuales.

Tradicionalmente esto es producto de la combustión son utilizados como materiales de construcción en obras de ingeniería ya que una de las propiedades más importantes de las cenizas volantes es su carácter puso puzolánico; es decir, su capacidad para combinarse con la cal para formar un aglomerado hidráulico. Por ello los cementos a partir de cenizas volantes tienen un poder de retención de agua excepcional y un elevado poder aglomerante.

Además, este modo de reutilización de las cenizas volantes permite reducir la emisión  $\text{CO}_2$  que se generaría al producir la fracción de cemento sustituido por las cenizas volantes, al mismo tiempo que se reduce el consumo de materias primas naturales.

La utilización de cenizas volantes en la fabricación de hormigón tiene como finalidad la reducción de la cantidad de cemento. La sustitución de una fracción del cemento del hormigón por cenizas volantes resuelve satisfactoriamente este problema. Así pues, las cenizas volantes pueden utilizarse en el hormigón de dos maneras: como elementos activos, aprovechando su carácter puso puzolánico, o como elemento inerte es decir como árido. Las cenizas volantes se incorporan para mejorar la granulometría de la arena, para formar parte de conglomerante como producto cementicio o para ambas finalidades [14].

### 2.12 Chamota

La chamota se produce por calcinación de arcilla caolinita en un horno rotatorio. Se ha utilizado para la unión de cerámica para aplicaciones refractarias y resistentes a la fluencia debido a su contenido de mulita. La chamota también se ha mezclado con arcillas para reducir las tensiones de sinterización que producen grietas y defectos [23].

La chamota tiene un contenido mínimo de: 40 % de alúmina, un 30 % mínimo de sílice, un 4% máximo de óxido de hierro (III), un 2% máximo de óxido de calcio y de óxido de magnesio en total. Su punto de fusión es de unos 1780 C. Esta absorbe un máximo del 7% de agua.

La chamota se utiliza en la fabricación de alfarería o cerámica y en escultura, para obtener una textura rústica. Evita defectos como el agrietado y la laminación. Añade resistencia a la cerámica. Cuanto más finas sean las partículas de la chamota, más estrechamente se unen con la arcilla y más denso y fuerte será el producto cocido final. Otros usos para la chamota son en el procesamiento del varistor un metal óxido de zinc (ZnO).

Esta materia prima podría dar en su composición química aproximada:

- 40% alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- 30% sílice ( $\text{SiO}_2$ )
- 4% óxido de hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como máximo
- 2% como máximo óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )
- Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )



### 2.13 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se definen las porcelanas triaxiales y en particular a las porcelanas eléctricas, destacando su importancia para su uso como aisladores eléctricos y se estudian sus principales características. También se mencionan los principales componentes que forman las porcelanas triaxiales y en las materias primas que se utilizaran como sustitución (ceniza volante y chamota). Por último, se revisa el proceso de elaboración de aisladores eléctricos

## Capítulo 3

# Metodología Experimental

### 3.1 Introducción

En este capítulo se detalla el proceso de obtención de las probetas experimentales de porcelana eléctrica para el desarrollo de este proyecto de investigación. También, se especifican las técnicas de caracterización utilizadas para determinar las propiedades físicas, cristalográficas, mecánicas y microestructurales, así como el diseño experimental de cada composición propuesta.

### 3.2 Técnicas y equipos de caracterización

Los aspectos fisicoquímicos de estructura y composición necesarios para la identificación o descripción de un material, no es más que las características de estos. Por lo tanto, el uso de técnicas y métodos de caracterización nos ayudan a definir o establecer ciertas características de interés. En los siguientes subtemas se tratará acerca de las técnicas de caracterización utilizadas para definir propiedades de los cuerpos porcelánicos que se desarrollan en el presente estudio.

#### 3.2.1 Caracterización de las materias primas mediante análisis químico (fluorescencia de rayos X)

La técnica de fluorescencia de rayos X se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X.

La fluorescencia de rayos X tiene como propósito principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra.

La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X. Esta radiación, convenientemente de un haz de luz, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico  $d$ ) que la difracta en un ángulo ( $\theta$ ) dependiente de su longitud de onda ( $\lambda$ ) por la ley de Bragg ( $\sin \theta = n\lambda/2d$ ). Un detector que puede moverse sobre un determinado rango de dicho ángulo mide el valor de la intensidad de radiación en un ángulo determinado y por tanto, para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia [23].

Existen programas que permiten el análisis de muestras, los cuales están compuestos por paquetes computacionales, o software analítico. Un ejemplo de ellos es el que tiene como nombre Super Q, utilizando el espectrómetro marca Philips modelo Magix Pro.

### **3.2.1.1 Análisis de la composición química de las materias primas**

En la tabla 6 se muestra la composición química de las materias primas utilizadas para la fabricación de las probetas experimentales, basados en los resultados de fluorescencia de rayos X. La chamota fue proporcionada por industria ProlecGE. La ceniza volante fue proporcionada por la Termoeléctrica CFE Carbón II Nava, Coahuila. Las materias primas utilizadas típicamente para la fabricación de aisladores eléctricos de porcelana son de grado industrial.

**Tabla 6.** Composición química de las materias primas.

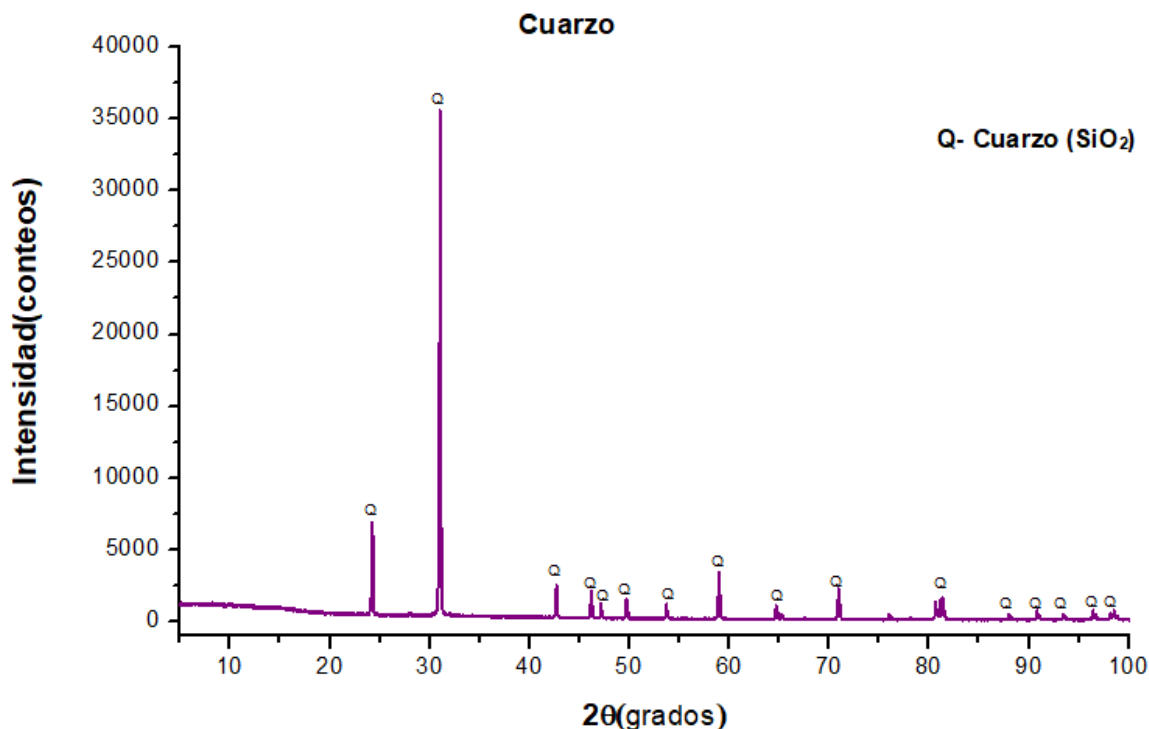
	Arcilla	Cuarzo	Feldespato	Chamota	Ceniza Volante
ÓXIDOS	%PESO	%PESO	%PESO	%PESO	%PESO
Na <sub>2</sub> O	0.41	0.39	2.53	-	-
MgO	0.12	<0.10	<0.10	-	0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.47	1.57	16.07	18.57	21.61
SiO <sub>2</sub>	62.14	97.06	68.09	72.53	57.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.61	-	0.43	0.62	0.48
K <sub>2</sub> O	1.25	0.54	10.97	3.60	2.20
CaO	0.6	0.17	1.05	1.12	5.26
TiO <sub>2</sub>	4.18	0.13	0.11	1.57	1.82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.16	0.10	0.64	1.68	10.54
BaO	<0.10	-	<0.10	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	0.26	-

### 3.2.2 Caracterización de las materias primas mediante difracción de rayos X (DRX)

La aplicación principal de esta técnica de análisis por DRX de muestras en polvo es lograr identificar y cuantificar especies minerales como fases cristalinas mixtas (policristalinas) y fases amorfas, así mismo proporciona información sobre el estado estructural de las mismas. La difracción está basada en las interferencias de las ondas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación [24].

Los siguientes difractogramas muestran los resultados de la caracterización de los polvos de las materias primas, obtenidos mediante la técnica de difracción de rayos X, donde se pueden apreciar las fases mineralógicas presentes de cada una de las materias primas.

En la Fig. 8 se muestra el patrón de difracción obtenido del análisis realizado por difracción de rayos X a la muestra de cuarzo en polvo, donde se puede apreciar como fase mineralógica principal el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).



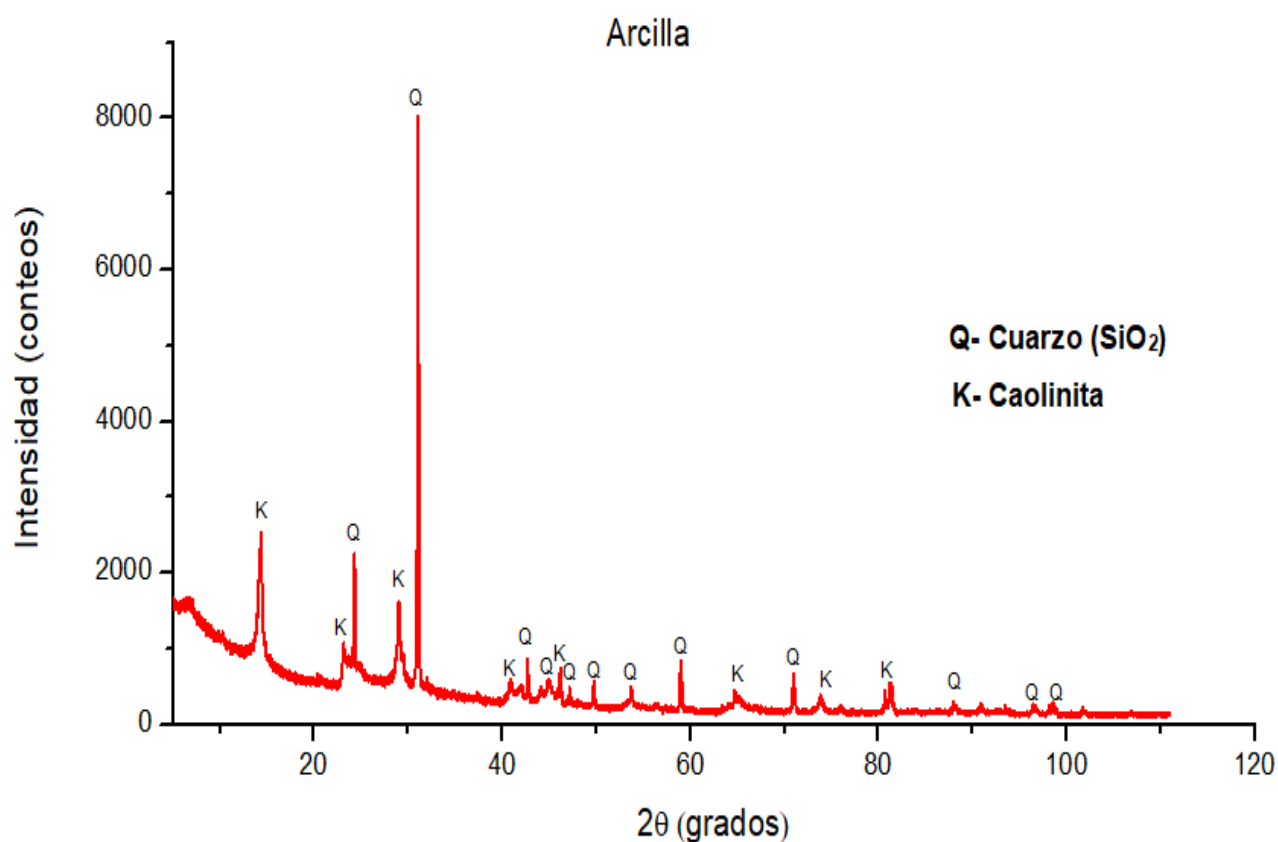
**Fig. 8.** Patrón de difracción de DRX del cuarzo.

Las Figs. 9, 10 y 11 muestran los patrones de difracción de DRX que se obtuvieron para el material arcilloso, el caolín y el feldespato, respectivamente.

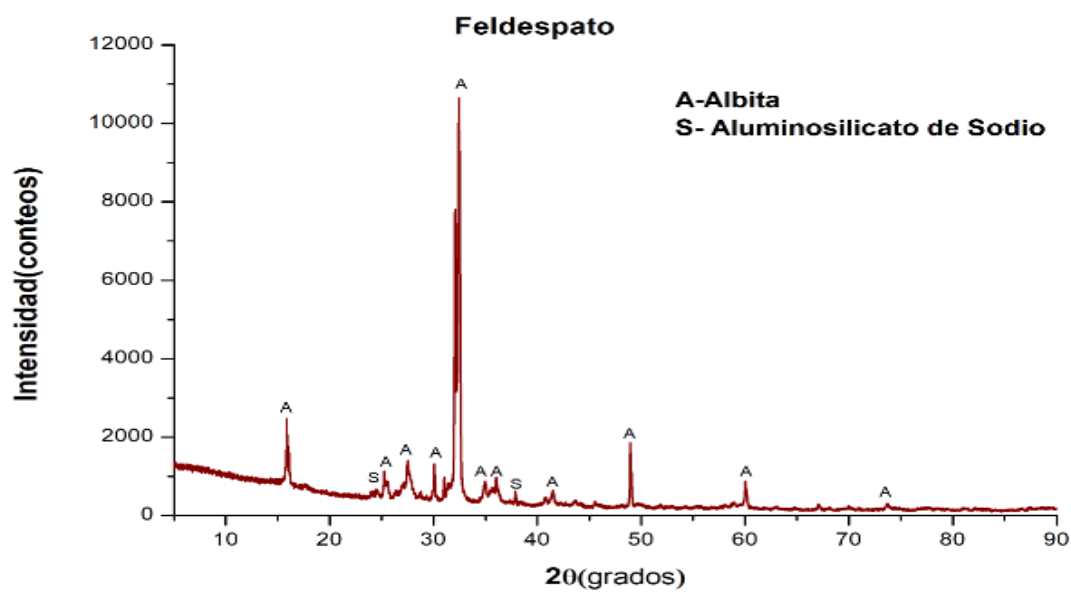
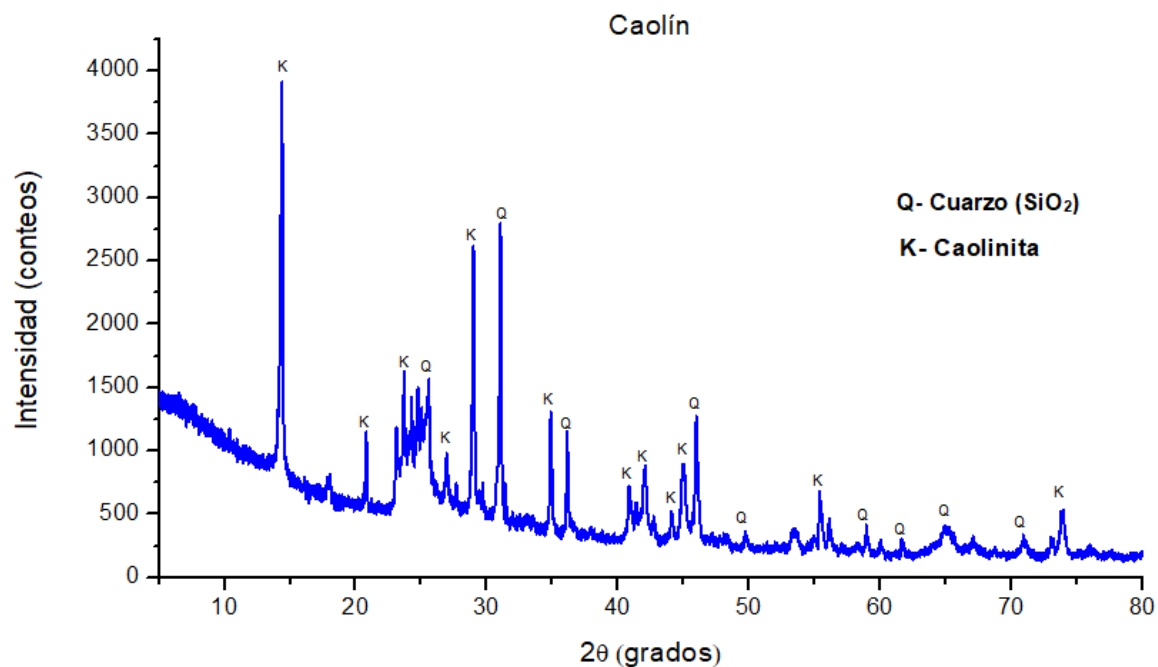
En la materia prima de la arcilla fueron identificadas dos fases cristalinas, un aluminosilicato hidratado ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), conocido frecuentemente como kaolinita y el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).

En el caolín que se utilizó como materia prima para las muestras, se identificaron dos fases la kaolinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).

En la materia prima feldespática se identificaron dos fases, como fase principal se encontró la albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), la otra fase identificada fue un aluminosilicato de sodio ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ).



**Fig. 9.** Patrón de difracción de DRX de la arcilla.



En los difractogramas realizados a las materias primas ceniza volante y chamota que se muestran en las imágenes 12 y 13 respectivamente, se revelaron la presencia de dos fases, la mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), y el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ).

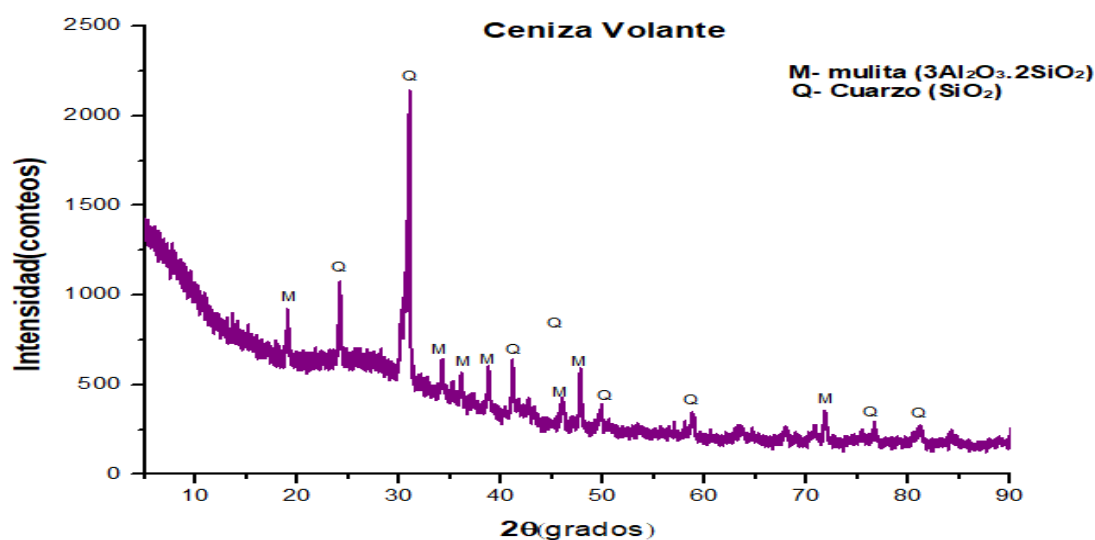


Fig. 12. Patrón de difracción de DRX de la ceniza volante.

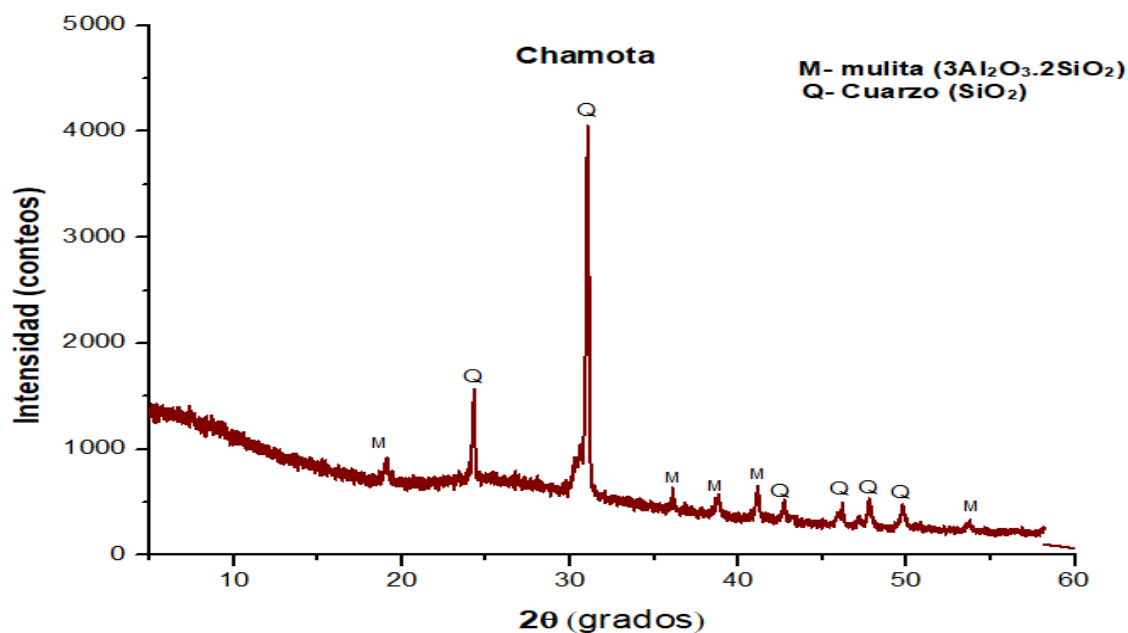


Fig. 13. Patrón de difracción de DRX de la chamota.



### 3.2.3 Microscopía electrónica de barrido

Se utilizó la técnica de microscopio electrónico de barrido (MEB) con el objetivo de observar los rasgos microestructurales, tales como, distribución de fases, tamaño de granos, morfología, composición química semicuantitativa y porosidad, de las materias primas y de las probetas experimentales.

El microscopio electrónico de barrido utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido (ver Fig. 14) está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies.



**Fig. 14.** Microscopio electrónico de barrido que se utilizó en la presente investigación.

### 3.3 Diseño de experimentos

Esta investigación se realizó con el objetivo de estudiar la factibilidad de la sustitución parcial de materia prima tradicional por materia prima alterna (ceniza volante y chamota) en matrices porcelánicas para el desarrollo de una porcelana eléctrica sustentable con propiedades similares a las porcelanas convencionales. Para el cumplimiento de dicho objetivo, se desarrolló la matriz de experimentos y se definieron 9 formulaciones (tabla 7). Una formulación base (sin contenido de chamota y ceniza volante), 8 formulaciones con variaciones de adición de chamota y ceniza volante.

**Tabla 7.** Composiciones de las formulaciones experimentales estudiadas (% en peso).

Formulación	% en peso			
	Cuarzo	Feldespatos	Arcilla + Caolín	Ceniza volante + Chamota
<b>A</b>	26.40	26.38	47.22	-
<b>B</b>	23.90	23.88	47.22	5
<b>C</b>	22.40	22.38	47.22	8
<b>D</b>	20.40	20.38	47.22	12
<b>E</b>	18.90	18.88	47.22	15
<b>F</b>	21.40	26.38	47.22	5
<b>G</b>	18.40	26.38	47.22	8
<b>H</b>	14.40	26.38	47.22	12
<b>I</b>	11.40	26.38	47.22	15

La primera formulación denominada A es la base o de control, la cual consiste en la composición característica de la porcelana eléctrica sin la sustitución de ceniza volante y chamota. Las formulaciones B, C, D y E corresponden a la sustitución de cuarzo y feldespatos por ceniza volante y chamota en un 5, 8, 12 y 15 % en peso. Las formulaciones F, G, H e I corresponden a la sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota en un 5, 8, 12 y 15 % en peso.

### 3.4 Elaboración de probetas experimentales

En la elaboración de las probetas experimentales, se varió el porcentaje en peso de las materias primas dependiendo del tipo de formulación experimental. Para la preparación de la formulación base, primeramente, se llevó a cabo el pesaje de los polvos de las materias primas considerando el porcentaje en peso indicado en la tabla 6. Luego de seleccionar los porcentajes en peso de las materias primas, arcilla, feldespato, caolín y cuarzo, éstas fueron mezcladas homogéneamente mediante agitación mecánica por un periodo de tiempo de 10 minutos. El resultado de la mezcla se coloca en el interior de un dado metálico para que posteriormente se realizara el conformado de las probetas por prensado uniaxial aplicando una presión de 100 MPa durante un tiempo de 2 minutos.

El procedimiento que se llevó a cabo para elaborar las formulaciones con adición de ceniza volante y chamota fue similar que para la formulación base. Se pesaron los polvos de las materias primas tradicionales para porcelana eléctrica y las materias primas alternas ceniza volante y la chamota de acuerdo con los porcentajes en peso de la tabla 6. Enseguida se procede al mezclado de las materias primas tradicionales junto con las materias primas alternas. Posteriormente, se lleva cabo el proceso de homogenizado mecánico de las mezclas y su introducción al molde para la realización del conformado de las probetas porcelánicas en verde.

La conformación de las probetas en verde, tanto la base como las de adición de ceniza volante y chamota se llevaron a cabo mediante el prensado uniaxial, donde se utilizó una prensa de marca Dogo Tuls de 12 toneladas de capacidad y un dado para prensado de acero D2 con acabado espejo (ver Fig. 15).

Para la realización del prensado se limpió el dado para que quedara libre de óxido o cualquier otra impureza que pudiera presentar, así de esta forma evitar la contaminación de las probetas. Una vez realizado el anterior procedimiento, se engrasó el dado con vaselina con el fin de poder realizar un fácil desmolde para las

probetas de porcelana eléctrica y así evitar posibles daños de la probeta experimental. Las probetas porcelánicas fueron elaboradas aplicando una presión de 100 MPa durante un tiempo de 2 minutos, dando como resultado probetas cilíndricas de 25 mm de diámetro por 16 mm de altura (ver Fig. 16). Se elaboraron 8 probetas de porcelana eléctrica por cada formulación dando un total de 72 probetas.



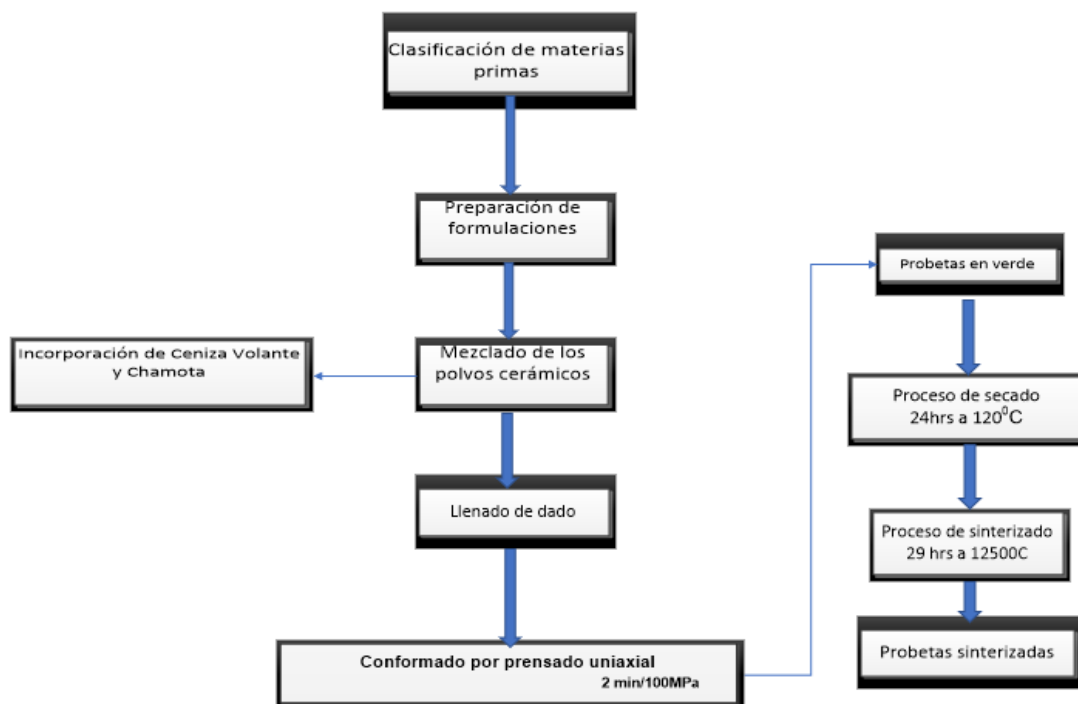
**Fig. 15.** a) Prensa hidráulica de 20 toneladas utilizada para el conformado de las probetas porcelánicas, b) Dado utilizado para las probetas porcelánicas.



**Fig. 16.** Probetas experimentales de porcelana eléctrica de forma cilíndricas obtenidas después del prensado uniaxial.

Una vez realizado el prensado, las probetas en estado en verde fueron sometidas a un proceso de secado en un horno convencional eléctrico a una temperatura de 120 °C durante 24 horas, con el objetivo de eliminar el exceso de agua que pueda existir, de esta forma se evita un agrietamiento en las probetas durante el proceso de sinterizado.

Después del secado y como última etapa del proceso de elaboración de las probetas experimentales, las probetas fueron colocadas en un horno industrial tipo túnel, donde se llevó a cabo el tratamiento de quemado o sinterizado de las mismas. Las probetas se mantuvieron alrededor de 32 horas dentro del horno a una temperatura máxima de 1250°C.



**Fig. 17.** Esquema general para el procedimiento de obtención de las probetas porcelánicas eléctricas experimentales.

### 3.5 Propiedades físicas

Se llevaron a cabo varios análisis en las probetas porcelánicas después del proceso de sinterizado, con el fin de determinar y evaluar el efecto de agregar las materias primas alternas (ceniza volante y chamota) en las propiedades finales de la porcelana triaxial eléctrica.

Para evaluar este efecto se determinaron las propiedades físicas densidad, porosidad y porcentaje de absorción de agua de las probetas sinterizadas de acuerdo con la norma ASTM C373 (Standard Test Methods for Determination of Water Absorption and Associated Properties by Vacuum Method for Pressed Ceramic Tiles and Glass Tiles and Boil Method for Extruded Ceramic Tiles and Non-tile Fired Ceramic Whiteware Products).

### 3.5.1 Densidad, porosidad y porcentaje de absorción de agua

Las propiedades físicas (densidad, porosidad y absorción de agua) se determinaron por el método de Arquímedes como se describe en la norma ASTM C373. Este procedimiento consiste en realizar el pesaje de las probetas cilíndricas después del proceso de sinterizado para obtener el peso seco (ver Fig. 18).



**Fig. 18.** Pesaje de las probetas (peso seco y peso húmedo).

Después de pesar las probetas en seco, estas son colocadas en un recipiente con agua calentándola hasta que esta hierva, manteniendo el agua aproximadamente 5 cm arriba de las probetas cilíndricas. Cuando el agua comienza a hervir, las probetas se dejan durante 120 minutos bajo esta condición con el objetivo de que los poros sean rellenos con el agua del recipiente. Transcurrido el tiempo mencionado, las probetas son dejadas en reposo dentro del recipiente con agua, logrando enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente, este proceso tuvo una duración de 24 horas.

Posteriormente, las muestras fueron pesadas suspendidas dentro del agua con un aditamento compuesto por un alambre de cobre donde se coloca la probeta (ver Fig. 19), de esta forma es obtenido el *peso suspendido*.

A continuación, se secaron superficialmente las probetas con un paño y se pesaron nuevamente para obtener el *peso húmedo* (ver Fig. 19).

Se realizaron los cálculos de las propiedades físicas utilizando las ecuaciones siguientes:

$$Densidad (gr. cm^3) = \frac{D}{(M-S)} \quad Ec.1$$

$$Porosidad\ aparente\ (\%) = \frac{(M-D)}{(M-S)} * 100 \quad Ec.2$$

$$Absorción\ de\ humedad\ (\%) = \frac{(M-D)}{D} * 100 \quad Ec.3$$

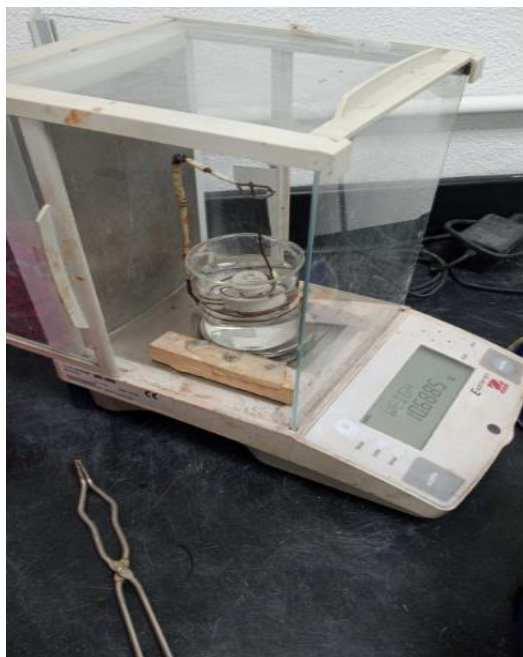
Donde:

M es el peso saturado (gr)

D es el peso de la muestra en seco (gr)

S es el peso suspendido (gr)





**Fig. 19.** Método de pesaje de las probetas (peso suspendido).

### 3.5.2 Propiedades mecánicas

Se realizaron las evaluaciones mecánicas a las probetas sinterizadas mediante la prueba de resistencia de compresión en frío (CCS) con el fin de determinar la influencia de agregar las materias primas alternas (ceniza volante y chamota).

#### 3.5.2.1 Resistencia a la compresión en frío

La prueba de resistencia a la compresión en frío que se le realizaron a las probetas experimentales sinterizadas de porcelana eléctrica fue realizada de acuerdo con la norma ASTM C773, Standard Test Method for Compressive (Crushing) Strength of Fired Whiteware Materials. La resistencia a la compresión es la capacidad que tiene un material para soportar una carga por unidad de área, esta se mide fracturando probetas cilíndricas en una máquina de ensayos de compresión.

Se realizó el ensayo de compresión en frío de las probetas utilizando una prensa hidráulica universal marca INSTRON modelo 600DX, con una capacidad de 600 kN, se llevaron a cabo 5 ensayos por formulación, a una velocidad de 0.3601 mm/min. La prensa utilizada se muestra en la Fig. 20. La prueba consistió en la colocación de la probeta cilíndrica alineada con el centro del cabezal de la prensa, luego se aplica la carga a una velocidad determinada hasta que ocurra la falla en la muestra.

Los valores de la resistencia a la compresión en frío se calcularon utilizando la ecuación 4.

$$\text{Resistencia a la compresión (MPa)} = \frac{F}{A} \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

F: carga total aplicada (N)

A: área de contacto (mm<sup>2</sup>)



**Fig. 20.** Equipo utilizado para la realización de los ensayos de compresión en frío (CCS).

### 3.5.2.2 Microdureza

La aplicación del ensayo de dureza en los materiales permite evaluar las propiedades de un material, tales como su fuerza, ductilidad y resistencia al desgaste. También permite determinar si un material o el tratamiento de un material son adecuados para el propósito deseado.

En un material cerámico, la dureza es una de las propiedades más frecuentemente medidas. Con la obtención del valor de dureza se puede caracterizar la resistencia a la deformidad, densificación y fractura del material. Este tipo de ensayos nos permite evaluar las propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material.

El ensayo de microdureza se realizó usando un microindentador Shimadzu HMV-G, (ver Fig. 21). Se realizaron 15 indentaciones por formulación, el tiempo de carga fue de 15 segundos, la carga utilizada fue de 1 kgf. Las indentaciones se realizaron en una superficie completamente pulida utilizando un indentador con punta de carburo de tungsteno para concreto. Este procedimiento se realizó de acuerdo con la norma ASTM- E 384–05a, los valores de dureza se calcularon utilizando la ecuación 5.

$$HV = 1.8544 \frac{P}{D^2} \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

HV: Dureza Vickers

D: Diagonal promedio de la huella ( $\mu m$ )

P: Carga aplicada (kgf)



**Fig. 21.** Equipo microidentador utilizado para medir la microdureza Vickers.

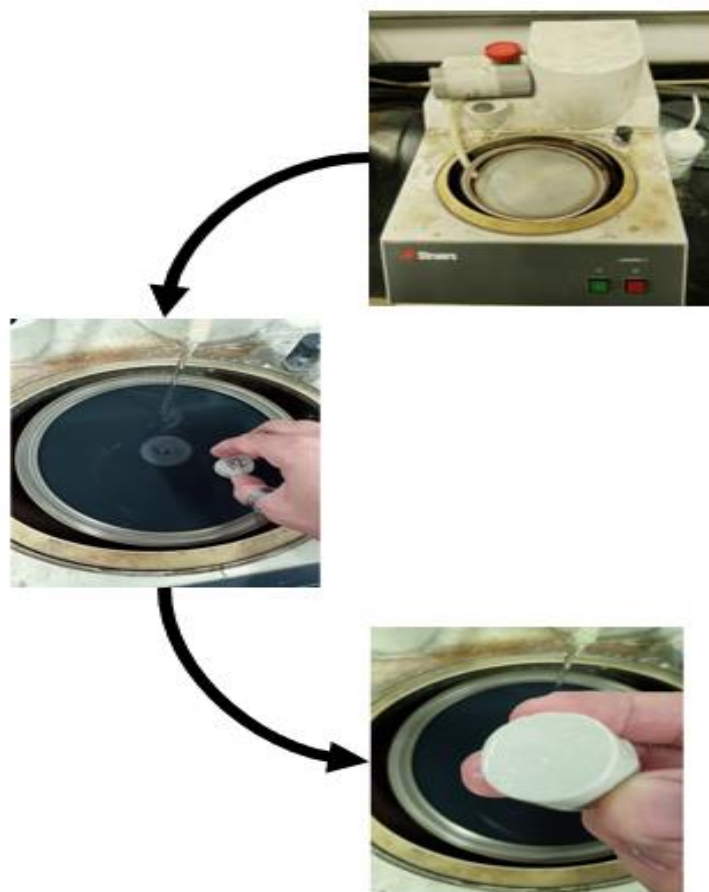
### 3.6 Análisis microestructural (microscopía electrónica de barrido)

Se realizó el análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido de las probetas de porcelana eléctrica después de ser sinterizadas. Para este análisis fue utilizado un microscopio electrónico (STEM – nano-SEM, por sus siglas en inglés) de marca FEI modelo NOVA NANOSEM 200 como se muestra en la Fig. 22.



**Fig. 22.** Equipo utilizado para en análisis microestructural.

Para la preparación de las probetas experimentales se realizó el pulido superficial de una de las caras de cada probeta utilizando una pulidora marca Struers (ver Fig. 23), se utilizaron lijas de carburo de silicio con número: 120, 220, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2400, 4000. El pulido se realizó hasta alcanzar un acabado espejo con el objetivo de obtener una superficie totalmente libre de defectos. Posteriormente, las probetas fueron recubiertas con una fina capa de oro, para que pudieran tener características conductoras, las cuales se requieren para realizar esta técnica.



**Fig. 23.** Pulidora utilizada para pulir muestras cerámicas.

### 3.7 Análisis mediante difracción de rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X se realizó para determinar las fases cristalinas en las probetas porcelánicas después del proceso de sinterizado. Se utilizó un difractómetro de rayos X marca Empryean de PANalytical, el cual se muestra en la Fig. 24.

Para el análisis de fases cristalinas en las muestras de porcelana eléctrica se prepararon muestras pequeñas de polvo, triturando los restos que quedaron de las probetas una vez que se realizaron los ensayos de compresión en frío.

Los fragmentos de las probetas cerámicas fueron triturados y molidos en un mortero de porcelana hasta alcanzar un tamaño de partícula de  $44\ \mu\text{m}$ . El polvo obtenido de las probetas es colocado en el difractómetro de rayos-X para realizar el análisis de fases. Las condiciones de trabajo utilizadas fueron, un voltaje de 40 kV con un amperaje de 40 mA, con radiación de cobalto ( $\text{Co K}\alpha$ ) y una longitud de onda de  $1.789\ \text{\AA}$ , el rango de ángulos de difracción fue de  $5^\circ$  a  $110^\circ$ , con un paso de 0.013 y 20s de permanencia en modo continuo.



**Fig. 24.** Equipo utilizado para el análisis de difracción de rayos-X de las probetas.

**3.8 Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se evaluaron las muestras mediante las pruebas antes mencionadas tanto físicas como densidad, porosidad y absorción de humedad, así como también las pruebas mecánicas, como fueron resistencia a la compresión en frío y microdureza. Estas pruebas nos brindaran información importante para analizar y determinar la mejor composición de las mezclas estudiadas. También se realizó el estudio de las fases formadas en las materias primas tradiciones de porcelana eléctrica y de las materias primas alternas utilizadas por medio de la difracción de rayos X. Finalmente, se estudiaron los rasgos característicos microestructurales de las probetas cerámicas experimentales.



## Capítulo 4

### Análisis y Discusión de Resultados Experimentales

#### 4.1 Introducción

En este capítulo se analizan y se muestran los resultados obtenidos de las evaluaciones que se realizaron a las probetas experimentales de porcelana eléctrica sinterizadas a 1250°C como son las pruebas físicas de absorción de agua, densidad y porosidad aparente.

Se discuten los resultados del análisis de difracción de rayos X, también se especifican los rasgos microestructurales de cada probeta a través de microscopia electrónica de barrido y se discuten los resultados de las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión en frío y microdureza.

Las pruebas se realizaron de acuerdo con todas las formulaciones mencionadas en los capítulos anteriores de adición de ceniza volante y chamota en (5, 8, 12 y 15 % en peso).

#### 4.2 Densidad, porosidad aparente y absorción de agua de las probetas porcelánicas sinterizadas

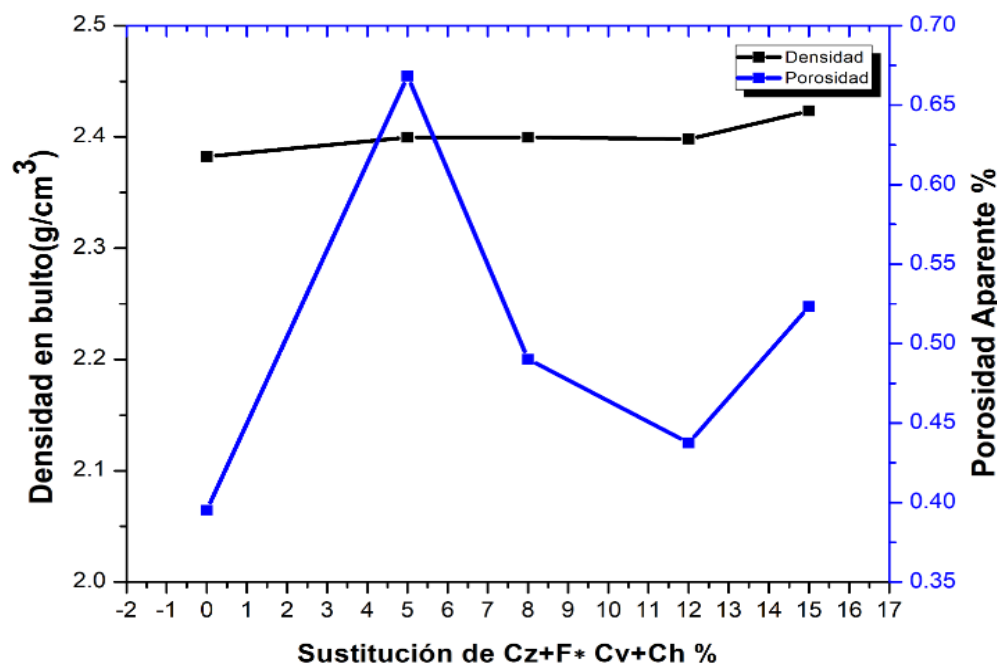
En la tabla 8 se muestran los valores de densidad y porosidad aparente de las probetas de porcelana eléctrica obtenidos después del proceso de sinterización. La porosidad en la porcelana eléctrica es un factor importante debido a que si ésta aumenta disminuye la conductividad eléctrica y la resistencia mecánica del material. En los aisladores eléctricos porcelánicos la porosidad debe ser menor del 1%.

**Tabla 8.** Valores promedios de densidad y porosidad aparente de las probetas.

Formulación	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad Aparente (%)
A	2.382	0.3951242
B	2.400	0.6682622
C	2.400	0.490184
D	2.398	0.4375483
E	2.423	0.5231717
F	2.400	0.4774133
G	2.404	0.2897181
H	2.397	0.4181568
I	2.373	0.359484

Mediante el análisis del gráfico de la Fig. 25, se puede observar que los valores de densidad aparente de las formulaciones de adición de materia prima alterna ceniza volante y chamota por cuarzo y feldespato se mantienen prácticamente sin cambios con respecto al valor de la formulación base A (2.382 g/cm<sup>3</sup>).

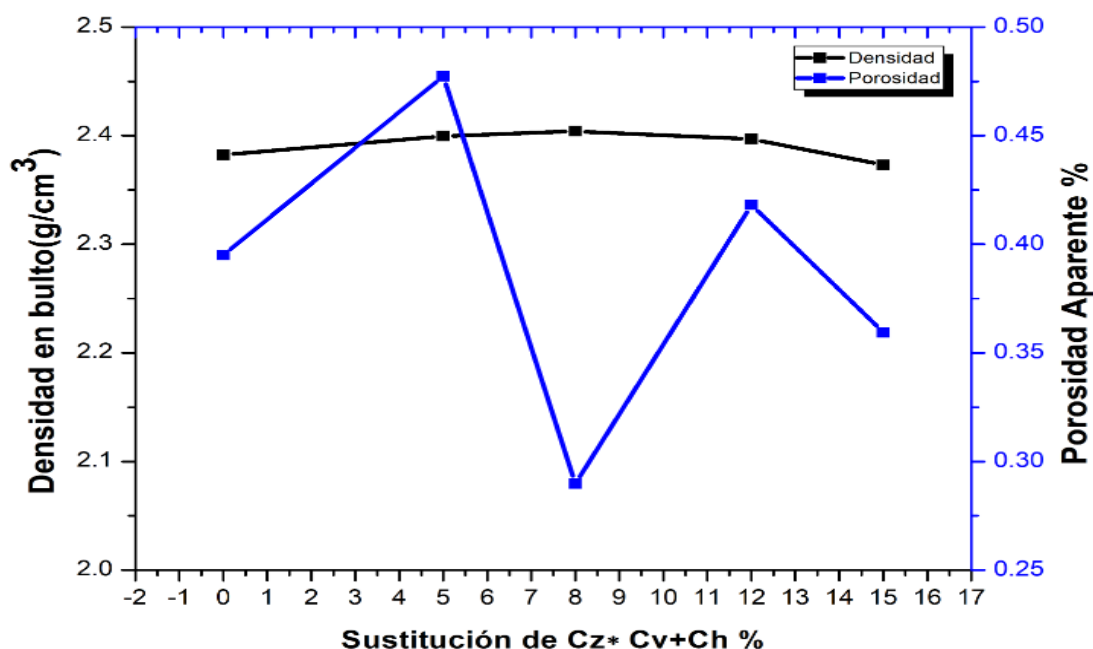
En dichas formulaciones de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota referidos como B, C, D y E (sustitución de 5, 8, 12 y 15 %, respectivamente), la densidad aumento en un 0.76 % tanto para la formulación B como para la formulación C y 0.67 y 1.72 % en las formulaciones D y E, respectivamente, con relación al valor de la densidad de la formulación base (A).



**Fig. 25.** Variación de la densidad y porosidad aparente de la formulación de sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (CV).

A su vez, mediante el análisis del gráfico de la Fig. 26, se puede observar que los valores de densidad aparente de las formulaciones de adición de materia prima alterna (ceniza volante y chamota) por cuarzo se mantienen prácticamente sin cambios con respecto al valor de la formulación base A ( $2.382 \text{ g/cm}^3$ ), similar a lo reportado en las formulaciones anteriormente descritas.

En las formulaciones de sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota referidas como F, G, H e I (sustitución de 5, 8, 12 y 15 %, respectivamente), la densidad aumento en un 0.76 % tanto para la formulación F, 0.92 % para la formulación G y 0.63 % y 0.38 % en las formulaciones H e I, respectivamente, con relación al valor de la densidad de la formulación base (A).



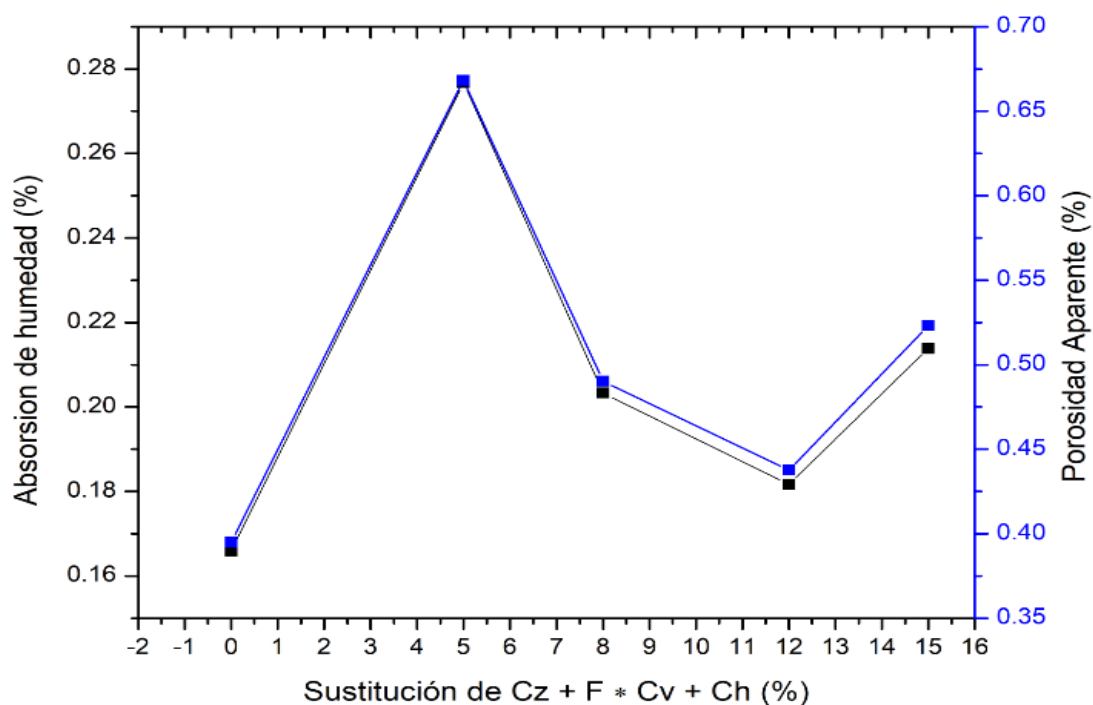
**Fig. 26.** Variación de la densidad y porosidad aparente de las formulaciones de sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).

Los valores de porosidad aparente y absorción de agua para todas las formulaciones con sustitución de materia prima tradicional por materia prima alterna (ceniza volante y chamota) son similares a los valores obtenidos en la formulación base o de control (ver tabla 9). En las Figs. 27 y 28 se puede observar que las formulaciones experimentales estudiadas mostraron valores de porosidad y absorción de agua de casi cero por ciento después del proceso de sinterización, lo cual indica que los valores alcanzados son acordes a los requerimientos de los cuerpos cerámicos de porcelana grado eléctrico.

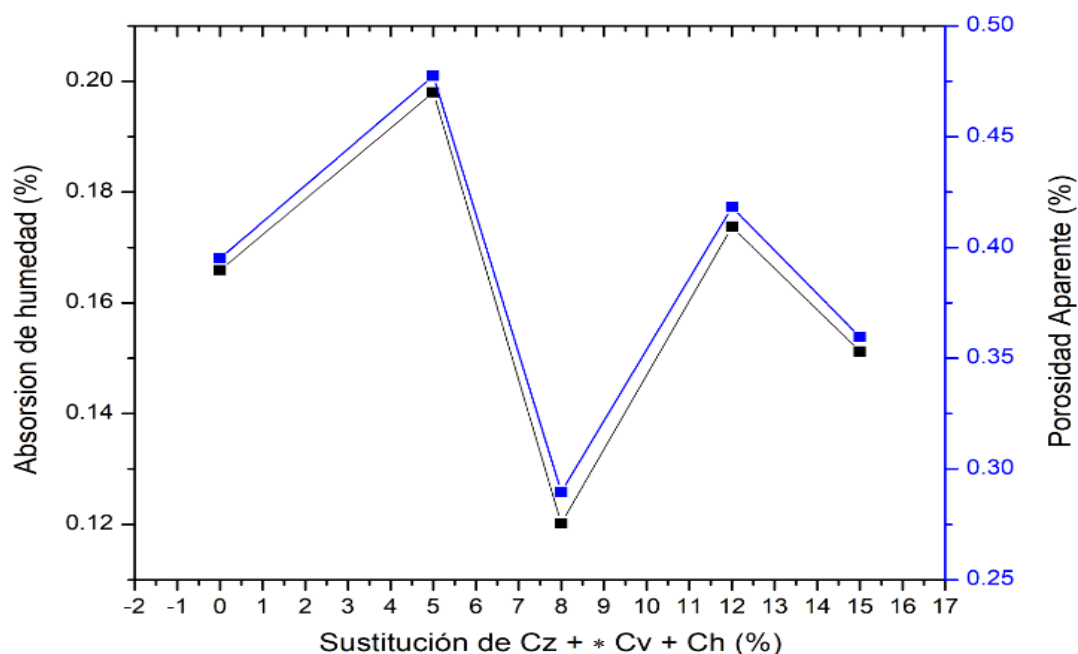
Es importante señalar, que los valores de porosidad demandados por cuerpos cerámicos conformados bajo los sistemas porcelánicos triaxiales deben ser menor al 1% para ser aptos en servicio como un elemento aislador eléctricos.

**Tabla 9.** Valores promedios de porosidad y absorción de agua de las probetas.

Formulación	Porosidad Aparente (%)	Absorción de agua (%)
A	0.3951242	0.165882
B	0.6682622	0.276766
C	0.490184	0.203286
D	0.4375483	0.181669
E	0.5231717	0.21386
F	0.4774133	0.197963
G	0.2897181	0.120196
H	0.4181568	0.173716
I	0.359484	0.15121



**Fig. 27.** Comportamiento de la porosidad y absorción de humedad de la formulación base con sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).



**Fig. 28.** Comportamiento de la porosidad y la absorción de humedad de la formulación base con sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).

### 4.3 Evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas sinterizadas

#### 4.3.1 Resistencia a la compresión en frío

Para la realización de las pruebas de compresión en frío se seleccionaron 5 probetas por formulación. Los valores reportados son el promedio de estas formulaciones. La prueba fue realizada bajo la norma ASTM C773, los resultados se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10** Valores promedios de resistencia a la compresión en frío de las probetas.

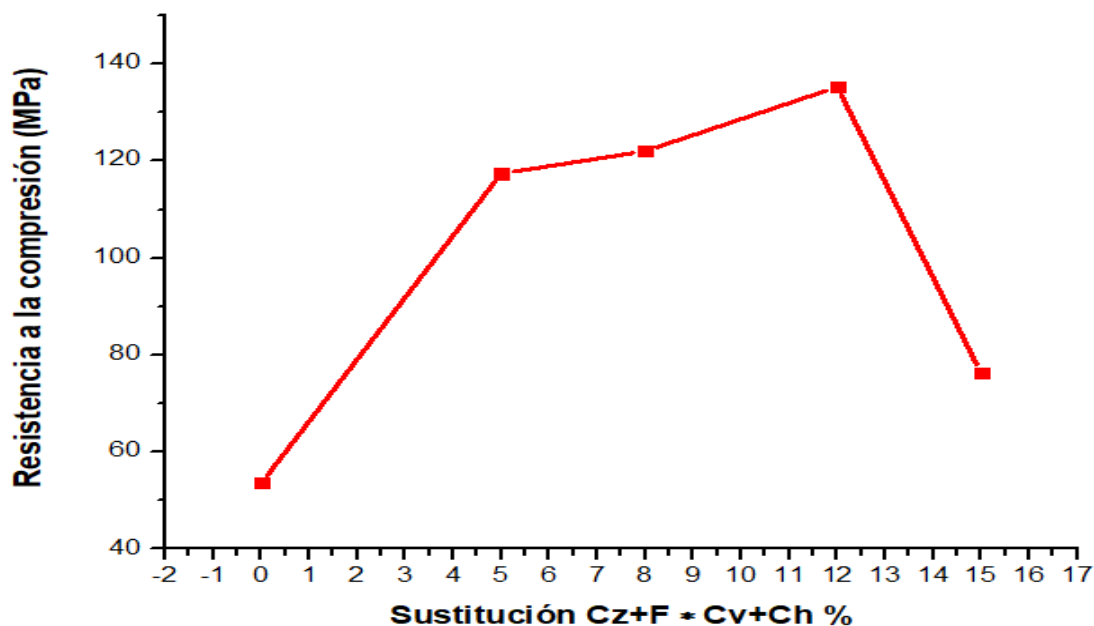
Formulación	Resistencia a la compresión en frío (MPa)	Porcentaje de mejora (%)
A	53.59	-
B	117.42	119.2
C	122.02	127.7
D	135.28	152.44
E	76.29	42.36
F	76.08	41.97
G	63.31	18.14
H	61.53	14.81
I	78.15	45.83

Los gráficos mostrados en la Fig. 29 muestran la tendencia al aumento de los valores de resistencia mecánica de las formulaciones con sustitución de ceniza volante y chamota con respecto a la formulación base. Los resultados muestran un valor de resistencia mecánica promedio de 53.59 MPa para la formulación base.

En las formulaciones de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota en 5, 8, 12 y 15 % en peso (B, C, D y E, respectivamente), hay un mejoramiento en la resistencia mecánica de 119.2 %, 127.7 %, 152.44 % y 42.36 % respectivamente con respecto a la formulación base (A). Como se muestra en los resultados anteriores, la formulación con mejor resistencia mecánica fue aquella con sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota en un 12 % en peso (formulación etiquetada como D), con un valor de 135.28 MPa correspondiente a un 152.44 % de mejora en base a la formulación de control. Este resultado se puede atribuir a una mayor concentración de la fase mulita, ya que la ceniza volante y la chamota tenían en su composición mineralógica a la mulita como fase. Además, sabemos que, a través de las reacciones químicas o evolución mineralógica del sistema porcelánico, cierta concentración de mulita se formará por

la interacción de la arcilla con el feldespato y nucleación de mulita con origen en el feldespato. Por lo tanto, este efecto combinado de mayor concentración de mulita con origen en las materias primas alternas adicionadas (chamota y ceniza volante) y la formación de mulita a través de la evolución mineralógica del sistema porcelánico tributan o contribuyen en la mejora de resistencia mecánica a través del entrecruzamiento de las agujas de mulita, lo cual es planetado en la hipótesis más antigua del reforzamiento mecánico a través de la mulita.

Cabe mencionar, que, aunque en la formulación E hay un aumento del 15% de adición de chamota y ceniza volante y pese que en teoría entre más concentración de mulita con origen en las materias primas alternas contribuiría a la resistencia mecánica, esto evidentemente no se cumplió. Ese fenómeno de decremento en resistencia puede atribuirse al efecto dañino de la sustitución parcial del cuarzo y por ende pierda estabilidad el cuerpo porcelánico. Así mismo, presumiblemente la fase vítrea pudo haberse incrementado contribuyendo a la disminución de resistencia mecánica.



**Fig. 29.** Gráfico de resistencia a la compresión en frío sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).

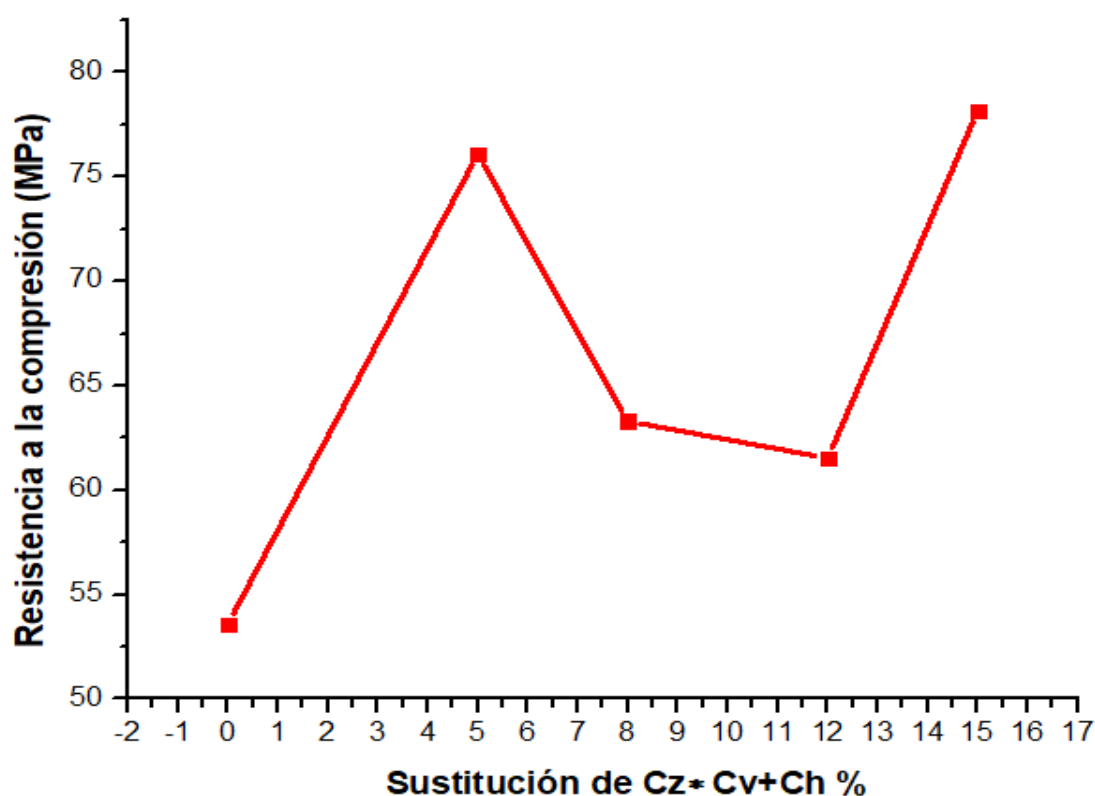


En la Fig. 30 se muestra el comportamiento mecánico de las formulaciones de sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota en 5, 8, 12 y 15 % en peso (F, G, H e I, respectivamente). Estas reportaron un mejoramiento en la resistencia mecánica en 41.97 %, 18.14 %, 14.81 % y 45.83 %, respectivamente con respecto a la formulación base. La formulación I (15 % en peso de sustitución) fue la que alcanzó el máximo valor de resistencia mecánica con 78.15 MPa.

Podemos observar mediante el gráfico que el comportamiento mecánico fue variable; ya que a la más baja sustitución se alcanza un valor de resistencia de 61.53 MPa, esto representa un mejoramiento del 41.97 %, lo cual indica que la presencia en concentración de mulita procedente de la materia prima alterna es benéfica para las propiedades mecánicas. Sin embargo, conforme incrementa el porcentaje de sustitución las propiedades mecánicas bajan, esto indica que la sustitución de cuarzo afecta la estabilidad mecánica del cuerpo porcelánico a tal grado que es evidente el efecto negativo.

Otro de los fenómenos que puede estar contribuyendo a esta disminución de resistencia es el exceso en concentración de fase vítrea, lo cual fragiliza el cuerpo cerámico. Este fenómeno relacionado con el aumento de fase vítrea es consistente con lo encontrado en las propiedades físicas, ya que en las formulaciones con 8 y 12 % en peso presentan muy baja porosidad, lo cual se relaciona con mayor fase vítrea.

A pesar del aumento de sustitución a un porcentaje del 15% hay un repunte del comportamiento mecánico alcanzando su máximo en esta sustitución. Este comportamiento es atribuido a que la cantidad de mulita existente en la matriz porcelánica balancea la falta de cuarzo y exceso de fase vítrea e inclusive llega a alcanzar su máxima resistencia mecánica



**Fig. 30.** Gráfico de resistencia a la compresión en frío sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).

#### 4.3.2 Microdureza

En la tabla 11 se muestran los valores promedios de microdureza de las probetas sinterizadas. Se realizaron 15 indentaciones por probetas, la prueba de microdureza se realizó bajo la norma ASTM- E 384–05a.

La Fig. 31 muestra una imagen donde se puede ver la huella en forma piramidal característica para la prueba de microdureza Vickers, la cual fue tomada con un microscopio óptico.

**Tabla 11** Valores promedios de microdureza.

Formulación	Microdureza (HMV)
A	678.3
B	750.25
C	728.86
D	772.4
E	743
F	748.9
G	749
H	740.4
I	756

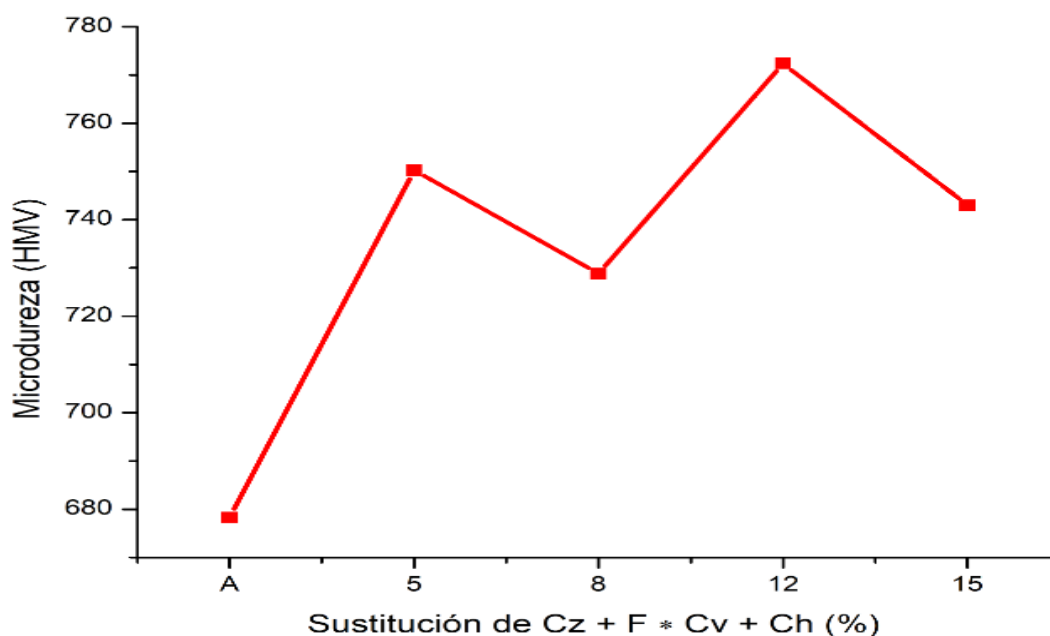
**Fig. 31.** Huella característica del ensayo de microdureza Vickers.

En las Figs. 32 y 33 se muestran los gráficos de microdureza, donde se puede apreciar una similitud con el comportamiento observado en el ensayo mecánico de compresión para las formulaciones de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota, como también en las formulaciones de sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota, con respecto a la formulación base de porcelana eléctrica.

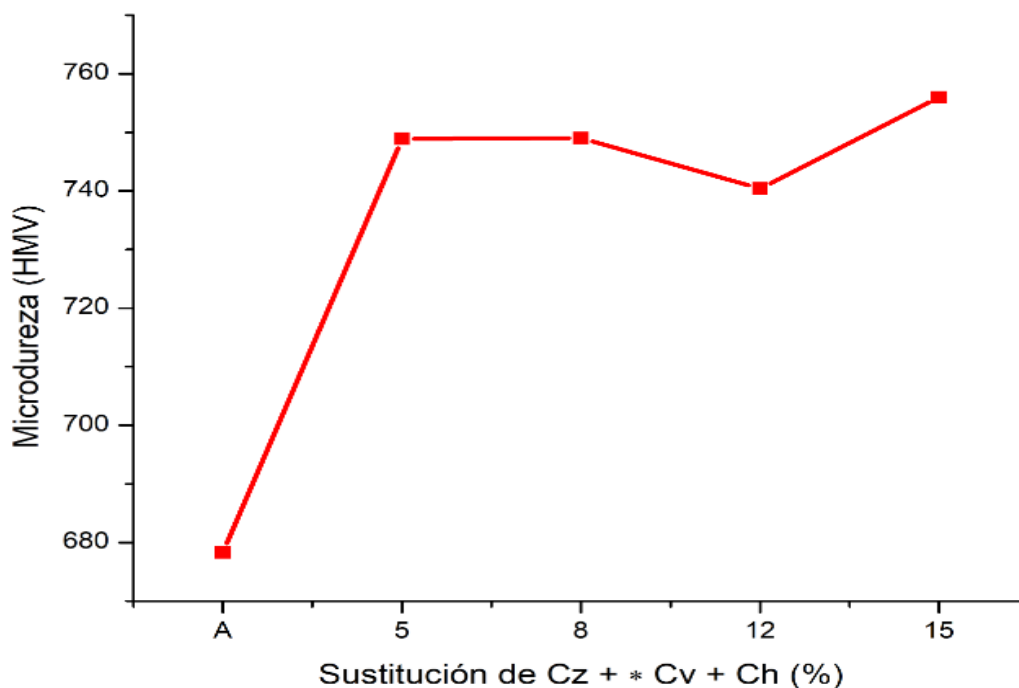
El valor más alto obtenido de microdureza (772.4 HMV) fue en la formulación de sustitución de cuarzo y feldespato por adición del 12% de ceniza volante y chamota (formulación D).

Los valores alcanzados en la microdureza son acordes y corroboran las tendencias en resistencia mecánica obtenidas en el ensayo de compresión. Esto señala que la adición de ceniza volante y chamota, contribuyen al reforzamiento mecánico de la matriz de porcelana eléctrica, gracias a que estas materias primas alternas cuentan con la fase de mulita en su composición mineralógica, la cual es importante para el reforzamiento mecánico como plantea la hipótesis de la mulita a través del entrecruzamiento de sus agujas y por ende el mejoramiento en propiedades mecánicas.

Mediante el estudio mecánico se encontró que la formulación D al tener mayor concentración de mulita alcanza la mejor propiedad mecánica tanto como dureza, así como lo sucedido y reportada en las pruebas de compresión en frío (CCS). Tal hallazgo señala que, a mayor concentración de mulita en la matriz porcelánica, las propiedades mecánicas incrementan.



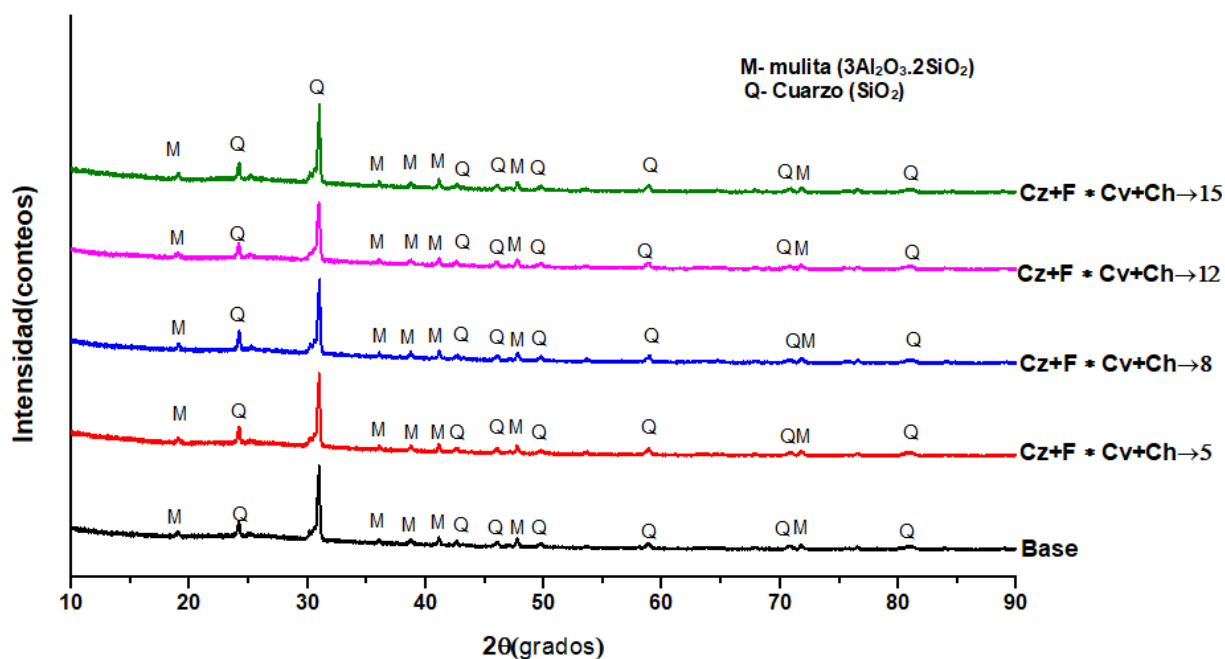
**Fig. 32.** Gráfico de microdureza Vickers para la formulación de sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).



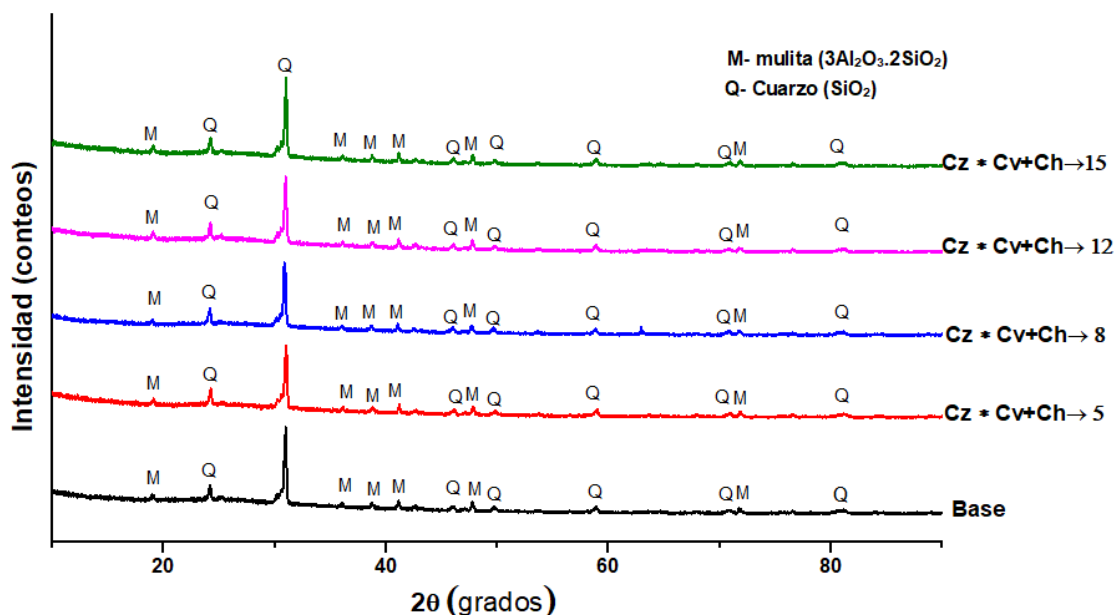
**Fig. 33.** Gráfico de microdureza Vickers para la formulación de sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).

#### 4.4 Difracción de rayos X (análisis de fases) de las probetas sinterizadas

El análisis de fases de las probetas porcelánicas sinterizadas se realizó mediante la técnica de difracción de rayos-X, donde se identificaron las principales fases cristalinas en cada formulación. Las Figs. 34 y 35 muestran los difractogramas comparativos de cada una de las formulaciones en estado sinterizado con respecto a la formulación base sinterizada. Mediante el análisis de fases se pudo apreciar como fases cristalinas principales al cuarzo y mulita, lo anterior para todas las formulaciones con adición de ceniza volante y chamota. Así mismo, se indica que la formulación base también presenta dichas fases cristalinas en su composición mineralógica (cuarzo mulita).



**Fig. 34.** Difractogramas comparativos de las formulaciones de sustitución de cuarzo y feldespato por chamota y ceniza volante después de ser sinterizadas.



**Fig. 35.** Difractogramas comparativos de las formulaciones de sustitución de cuarzo por chamota y ceniza volante después de ser sinterizadas.

En el patrón de difracción de la formulación base se puede observar la presencia de dos fases cristalinas, el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y la mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ). En las formulaciones porcelánicas de sustitución de cuarzo y feldespato por chamota y ceniza volante (B, C, D y E) y en las formulaciones de sustitución de cuarzo por chamota y ceniza volante (F, G, H e I), los patrones de difracción indican la presencia de las mismas fases cristalinas que se identificaron en la formulación base (A), es decir cuarzo y mulita. Esto indica que tanto la ceniza volante como la chamota no alteran la composición mineralógica del cuerpo porcelánico en términos cualitativos; sin embargo, cuantitativamente si se observa un incremento de la fase mulita.

También se puede observar que en la formulación de sustitución del 12 % de cuarzo y feldespato por chamota y ceniza volante (D), es la que tiene mayor presencia de fase mulita. Este aumento de mulita corrobora la hipótesis del reforzamiento mecánico a través de la mulita y los resultados obtenidos en la evaluación mecánica.

Finalmente, presumiblemente la fase vítrea pudo haberse incrementado contribuyendo a la disminución de resistencia mecánica reportada durante el análisis mecánico.

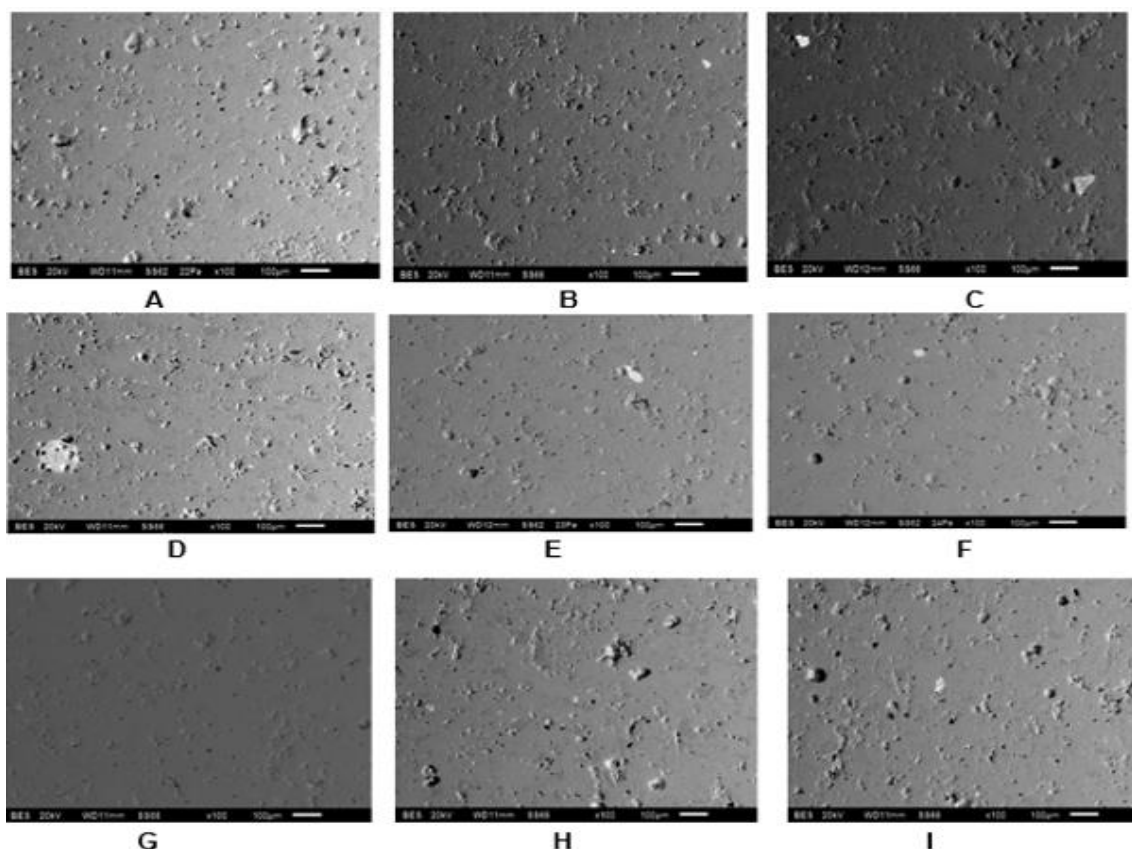
#### **4.5 Análisis microestructural y de fases de las probetas de porcelana eléctrica**

Se realizó el análisis microestructural de las probetas experimentales sinterizada de la formulación base (A), así como a las probetas de las formulaciones con adición de ceniza volante y chamota.

A través de este análisis se pudieron definir los rasgos microestructurales (fases presentes, porosidad, distribución de fases y tamaño de grano) de las formulaciones de porcelana eléctrica posterior al proceso de sinterización, logrando correlacionarlos con las propiedades físicas y mecánicas obtenidas.

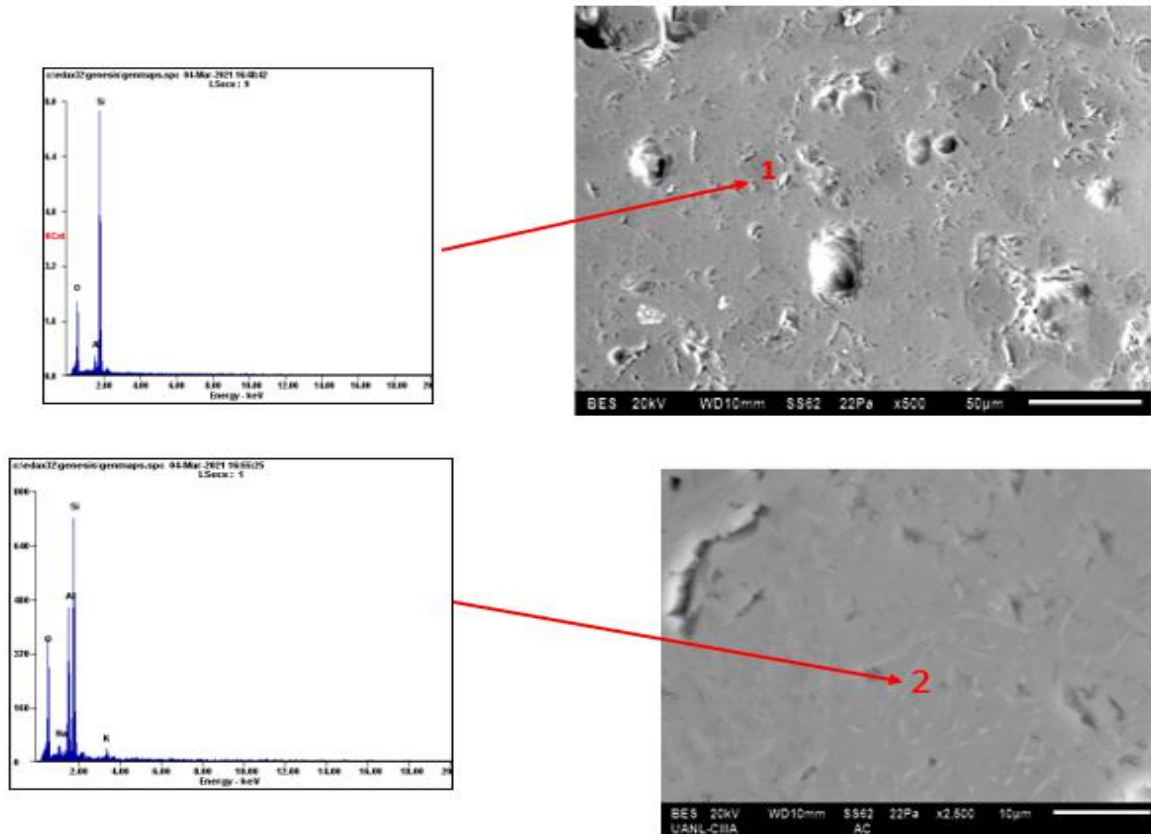
La Fig. 36 muestra la evolución microestructural de las formulaciones de porcelana eléctrica (de la A hasta la I) después del proceso de sinterizado. Donde se puede apreciar la fase vítrea (fase clara), la fase cuarzo (fase oscura), así como la porosidad tanto de morfología irregular como cuasi-esférica y las impurezas comunes, tales como óxidos de hierro, titanio y circonio





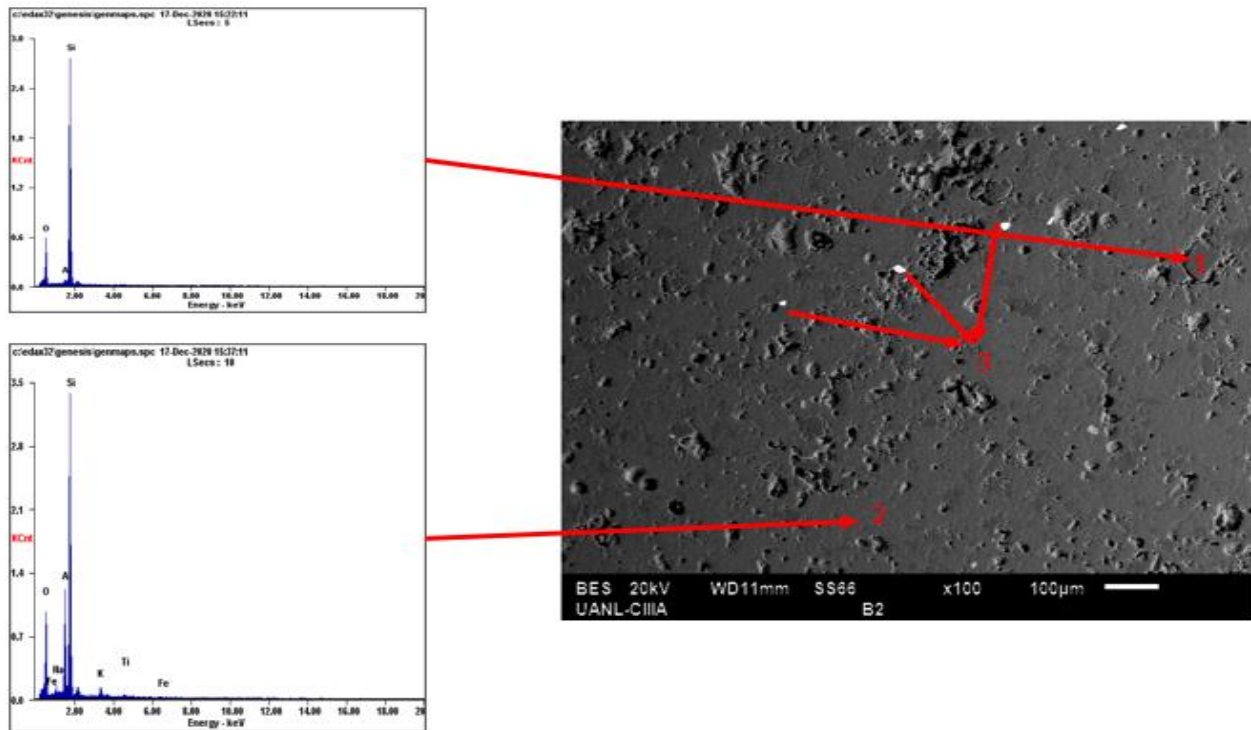
**Fig. 36.** Evolución microestructural de las formulaciones de porcelana eléctrica sinterizadas. A, formulación base o de control. B-E, formulaciones con 5, 8, 12 y 15% en pesos de sustituciones de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota, respectivamente. F-I, formulaciones con 5, 8, 12 y 15% en pesos de sustituciones de cuarzo por ceniza volante y chamota, respectivamente.

En la Fig. 37 se muestra la micrografía que corresponde a la formulación base (A) a una magnificación de 500X, donde se utilizó el método de electrones retrodispersados. La imagen muestra la microestructura característica de una porcelana silicosa, la cual está constituida por granos de cuarzo (corroborado mediante EDAX) embebidos en una fase amorfa, así como también se observan las grietas periféricas características alrededor de los granos de  $\text{SiO}_2$ . Así mismo en la Fig. 38, se puede observar la fase mulita a una magnificación de 2500X, lo cual fue corroborado mediante la técnica de EDAX. El tipo de mulita que presentó la microestructura es acicular en morfología con tamaños menores a las 10  $\mu\text{m}$ .



**Fig. 37.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación base (A) a 500X y 2500X, posterior al proceso de sinterizado. El número 1 indicando granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y el número 2, la fase mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ).

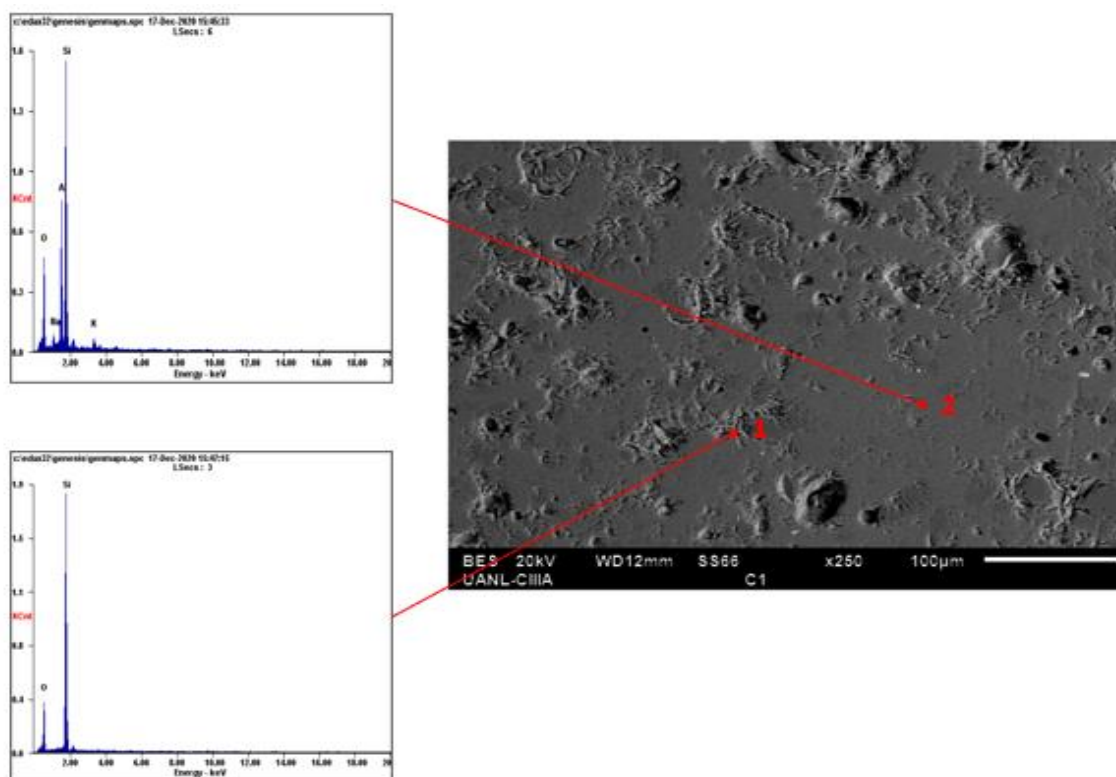
En la Fig. 38 se muestra la micrografía correspondiente a la formulación de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota en un 5 % en peso (formulación B), a una magnificación de 100X. Esta formulación presenta de manera general la microestructura formada por dos fases, una más oscura (fase cuarzo) que la otra (fase vítrea), al igual que en la formulación base. También se puede observar una buena distribución de los granos de cuarzo (fase más oscura) dentro de la fase vítrea (fase más clara), así como la presencia de grietas periféricas alrededor de los granos de cuarzo y de algunas impurezas típicas de óxido de hierro, titanía y circonia.



**Fig. 38.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación de adición de 5 % de ceniza volante y chamota (B) a 100X, posterior al proceso de sinterizado, 1 grano de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), 2 fase vítrea, 3 impurezas.

En la Fig. 39 se muestra la micrografía correspondiente a la formulación de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota en un 8 % en peso (C), a una magnificación de 250X. Esta formulación presenta una microestructura similar a la formulación base a excepción de las impurezas presentes con origen de las materias prima alternas. Se puede apreciar de manera general una microestructura formada por dos fases principales o mayoritarias: una más oscura referida como la fase del cuarzo y la otra más clara referida como la fase vítrea. Las fases más brillantes corresponden a impurezas comunes, tales como óxidos de hierro, titanio y circonio. Además, podemos observar la presencia de porosidad tanto de morfología irregular como cuasi-esférica, ésta última la cual es más predominante.

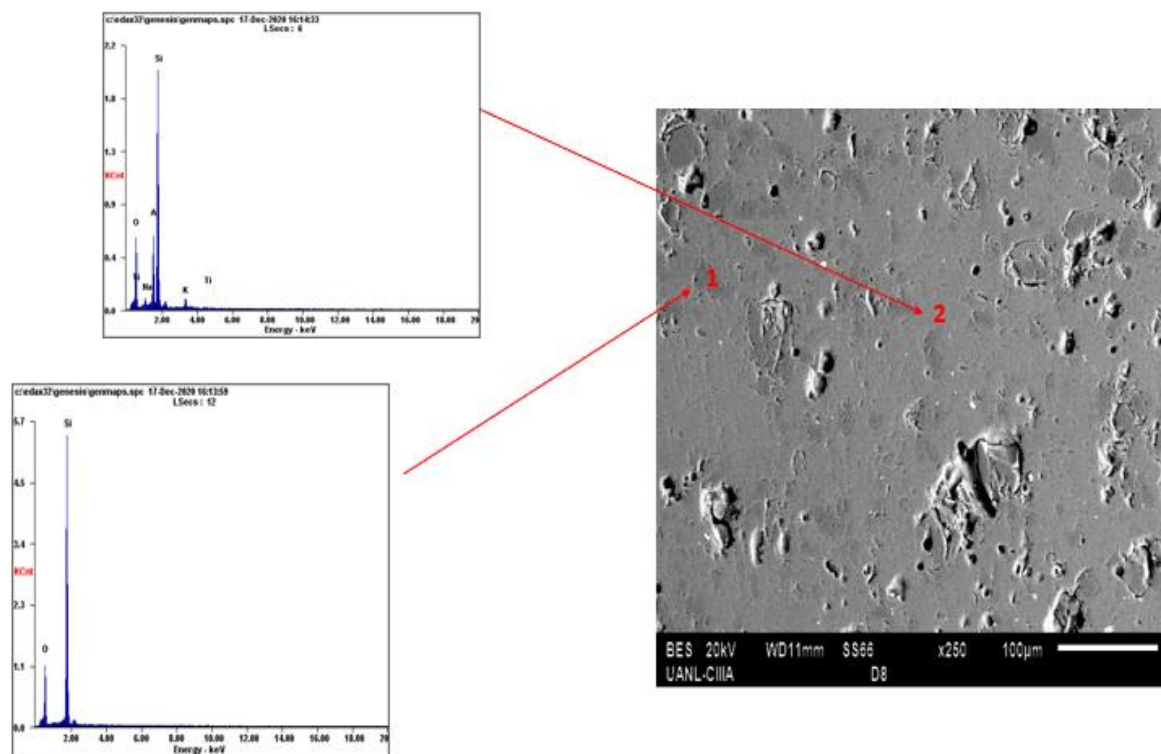
Es claro que hay una buena distribución de los granos de cuarzo (fase más oscura) dentro de la fase vítrea (fase más clara), así como también la aparición de grietas periféricas alrededor de los granos de cuarzo.



**Fig. 39.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación C a 250X, posterior al proceso de sinterizado. 1 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), 2 fase vítrea.

En la Fig. 40 se muestran la micrografía de la formulación de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota en un 12 % en peso (D) a una magnificación de 250X, donde se puede apreciar las dos fases, los granos de cuarzo (fase más oscura) y la fase vítrea (fase más clara), tal y como se observa en la formulación base.

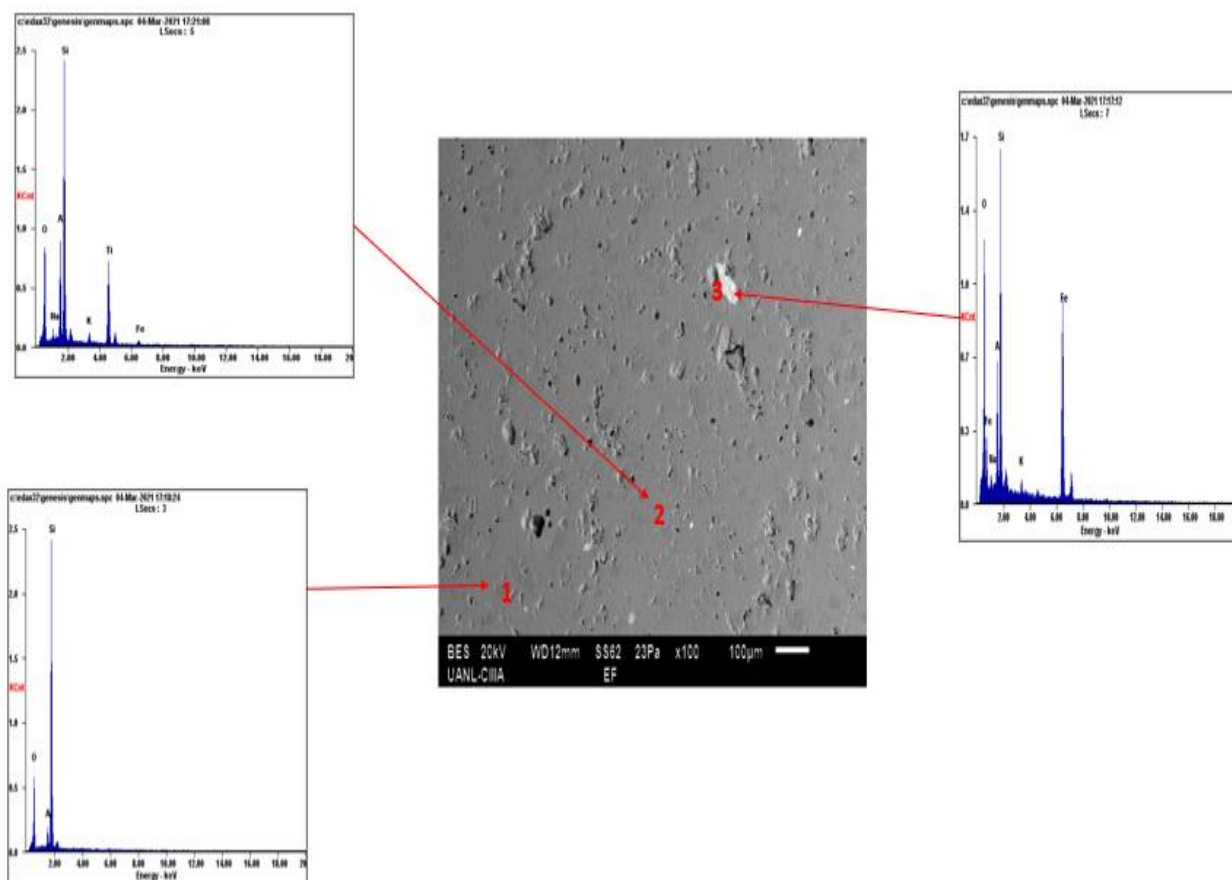
Dichas fases fueron corroboradas por la técnica de EDAX.



**Fig. 40.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación D a 250X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y el número indica 2 la fase vítrea.

En la microestructura de la formulación E, la cual corresponde a la sustitución del 15 % de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota, se pueden apreciar las fases características de una porcelana silicosa, la fase cuarzo y la fase vítrea (ver Fig. 41), tal como en las formulaciones antes mencionas incluyendo a la formulación base (A).

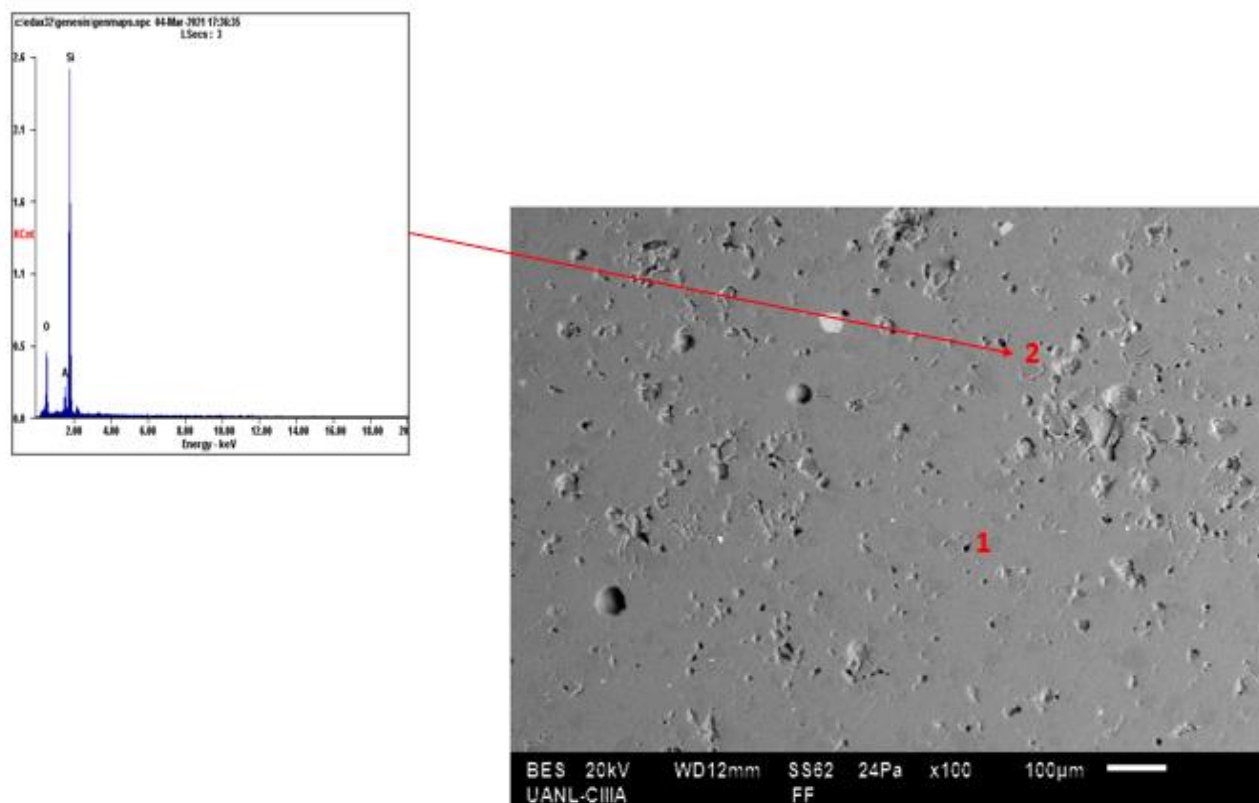
Mediante la técnica de EDX se puede apreciar la presencia de las impurezas como óxidos de hierro, titanio y circonio



**Fig. 41.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación E a 100X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), el número indica 2 la fase vítrea y el número 3 indica impureza de oxido de hierro.

La Fig. 42 muestra la micrografía de la formulación de sustitución del 5 % de cuarzo por ceniza volante y chamota (indicada por la letra F), donde podemos observar la presencia de porosidad tanto de morfología irregular como cuasi-esférica, esta última morfología se presenta como la más predominante. Es claro que hay una buena distribución de los granos de cuarzo (fase más oscura) dentro de la fase vítrea (fase más clara).

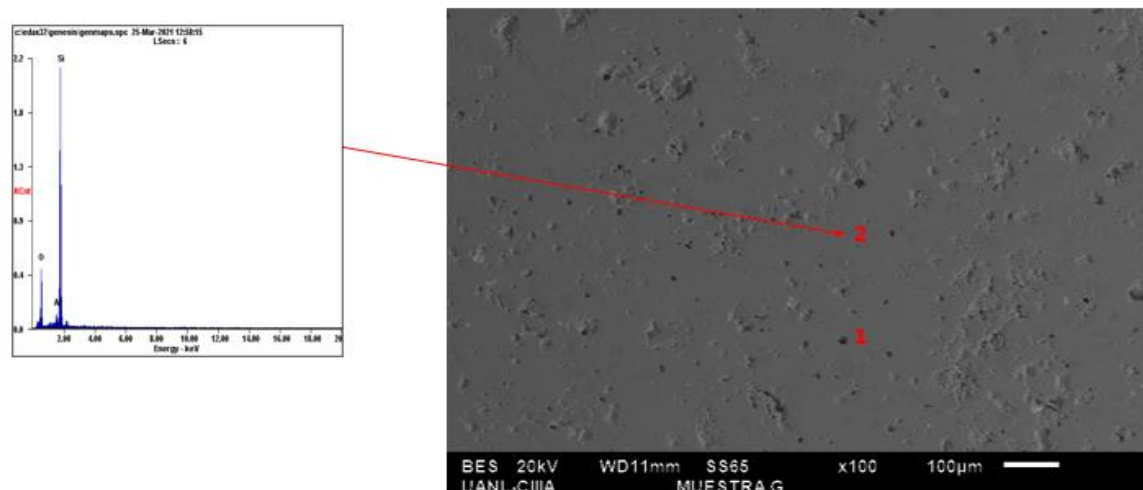




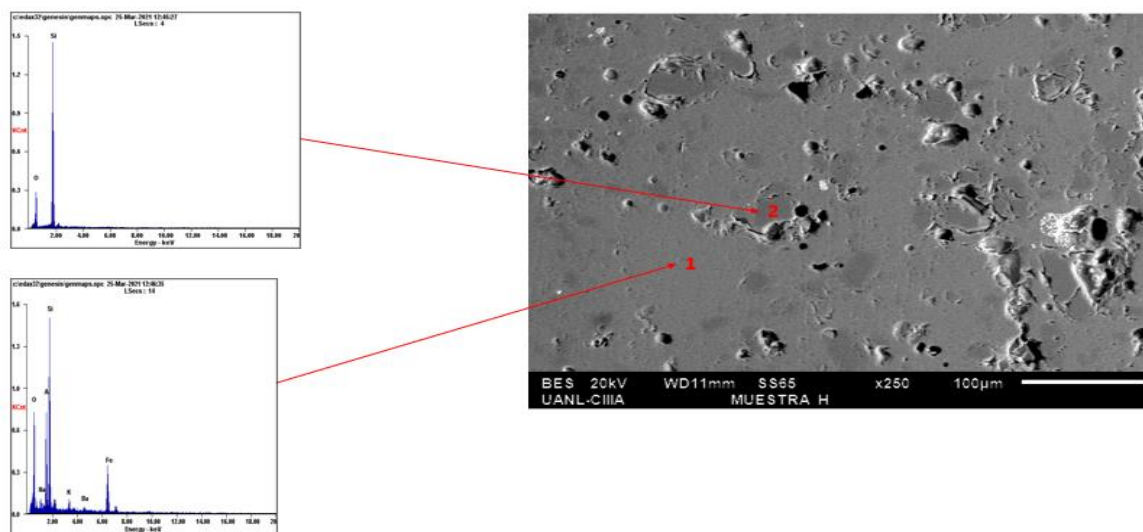
**Fig. 42.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación F a 100X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 porosidad, el número 2 la fase cuarzo.

En las Figs. 43 y 44 que corresponden a la micrografía de las formulaciones de sustitución de 8 y 12 % de cuarzo por ceniza volante y chamota respectivamente (G y H). Durante el análisis microestructural no se encuentran grandes diferencias con respecto a las anteriores microestructuras. De igual forma se presentan la fase clara (fase vítrea), la fase oscura (fase cuarzo), las impurezas ya antes mencionadas, así como la presencia de porosidad de morfología tanto irregular como cuasi-esférica.

De esta manera se puede destacar que todas las formulaciones anteriormente descritas comparten similitudes en cuanto a la microestructura desarrollada.



**Fig. 43.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación G a 100X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 porosidad, el número 2 la fase vítrea.

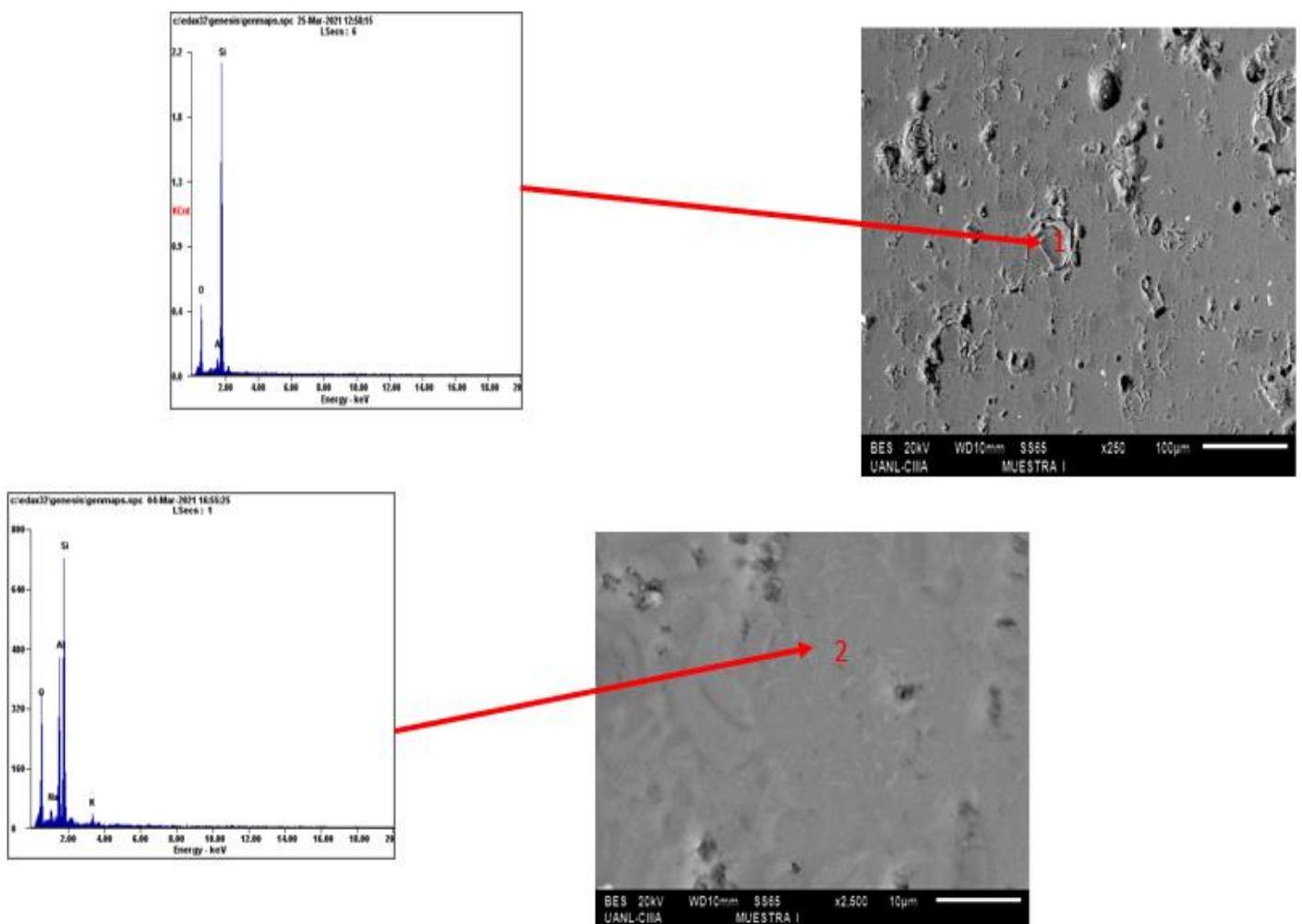


**Fig. 44.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación H a 250X, posterior al proceso de sinterizado. El número indica 1 la fase vítrea, el número indica 2 granos de cuarzo (SiO<sub>2</sub>).



En la formulación de sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota en un 15 % en peso (etiquetada como formulación I), a diferencia de las anteriores formulaciones si se pudo observar la fase de mulita como se muestra en la Fig. 45, lo cual fue corroborado mediante la técnica de EDAX.

El tipo de mulita que presento la microestructura es acicular en morfología con tamaños menores a las 10  $\mu\text{m}$ , cabe destacar que, para poder ver la fase mulita en las demás probetas porcelánicas, éstas deberán ser atacadas químicamente.



**Fig. 45.** Micrografías de la formulación de sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota en un 15 % en peso (I), 1 grano de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), 2 fase mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ).

Con la detección de mulita a concentración más alta, se corrobora lo analizado y discutido en la detección de fases mineralógicas por la técnica DRX y sustenta el reforzamiento mecánico de la matriz a través de la hipótesis de la mulita.

#### **4.6 Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se llevó a cabo la identificación de fases y el análisis microestructural de las probetas de porcelana eléctrica base y a las que se les adicionó ceniza volante y chamota. Se llegó a la conclusión de que en el cuerpo cerámico se identifican dos fases cristalinas principales la mulita y el cuarzo. A su vez, fue posible identificar la fase mulita realizando un mapeo para localizarla utilizando el SEM. Aunque en la formulación I, debido a la alta concentración de mulita, si fue posible visualizar la mulita sin necesidad de ataque químico.

Mediante las pruebas físicas se concluyó que los valores obtenidos de densidad y porosidad están acorde a las normas para aisladores eléctricos. Se obtuvo un aumento en las propiedades mecánicas para todas las formulaciones con adición de ceniza volante y chamota, lo anterior debido principalmente a la concentración de mulita en el cuerpo porcelánico.

### 5. Conclusiones

- A través del estudio realizado en esta investigación se pudo determinar la factibilidad de la sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota con la finalidad de desarrollar un producto sustentable con propiedades físicas y mecánicas similares a las de una porcelana triaxial silicosa para aplicaciones eléctricas sinterizada a 1250°C.
- Se obtuvieron densidades de alrededor de los 2.4 g/cm<sup>3</sup> de las muestras de porcelana eléctrica con adición de ceniza volante y chamota, lo cual se encuentran dentro de los rangos establecidos para porcelanas triaxiales eléctricas silicosas.
- Se registraron valores de porosidad por debajo del 1% en todas las formulaciones con adición de ceniza volante y chamota, lo cual es lo recomendado por las normas para las porcelanas triaxiales de grado eléctrico para su uso como aisladores eléctricos.
- Con la adición de la materia prima alterna se logró aumentar la resistencia mecánica en todas las formulaciones con respecto a la formulación base, obteniendo el mejor valor de incremento en la formulación del 12 % de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota con un 152.44 % de mejora.
- El porcentaje óptimo de sustitución de materia prima tradicional por materia prima alterna fue del 12 % de sustitución de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota, mostrando esta las mejores propiedades físicas y el mayor incremento de la resistencia mecánica después de ser sinterizadas a la temperatura de 1250°C.

### 6. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos y a las conclusiones de este trabajo, a continuación, se mencionan las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras con el fin de complementar los resultados obtenidos.

- Complementar el análisis de fases por un estudio de Rietveld para cuantificar el porcentaje de las fases de cada una de las formulaciones experimentales.
- Complementar las propiedades mecánicas realizando las pruebas mecánicas de flexión, para determinar la influencia de la ceniza volante y la chamota en el comportamiento mecánico de la porcelana triaxial silicosa estudiada.
- Realizar análisis termogravimétrico (TGA/DSC) en las formulaciones para determinar el comportamiento de las muestras a diferentes temperaturas.
- Realizar las pruebas dieléctricas de las probetas de porcelana eléctrica sinterizadas.

## 7. Referencias Bibliográficas.

- [1] R. Caligaris, N. Quaranta, M. Caligaris, y E. Benavidez, «Materias primas no tradicionales en la industria cerámica», *Bol. Soc. Esp. Cerámica Vidr.*, vol. 39, n.º 5, pp. 623-626, oct. 2000, doi: 10.3989/cyv.2000.v39.i5.779.
- [2] «Materias primas para la industria cerámica».
- [3] H. P. J. Changoluisa, «ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE LAS ARCILLAS DE LITA DE LA PROVINCIA DEL CARCHI, Y DE BELÉN DE LA PROVINCIA DEL AZUAY PARA LA FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE AISLADOR CERÁMICO DE BAJA TENSION», p. 82.
- [4] «Propiedades dieléctricas de una porcelana de baja tensión a través de espectroscopía de impedancias».
- [5] D. I. O. Riofrio, «FABRICACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DEL AISLADOR ELÉCTRICO DE CERÁMICA TIPO ANSI 53-2 Y SUS RESPECTIVOS BASTIDORES PARA SUJECCIÓN EN MAMPOSTERÍA», p. 252.
- [6] «INFLUENCIA DE LA INSERCIÓN DE NANO-ÓXIDOS CERÁMICOS SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE UNA PORCELANA TRIAXIAL».
- [7] A. G. Verbuch y J. M. G. Alvarez, «Microestructura de una porcelana triaxial», p. 24.
- [8] S. R. Bragança, C. P. Bergmann, y H. Hübner, «Effect of quartz particle size on the strength of triaxial porcelain», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 26, n.º 16, pp. 3761-3768, ene. 2006, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.01.012.

## Referencias Bibliográficas

- [9] S. Anderson y D. D. Kimpton, «Interference Films on Glass», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 34, n.º 5, pp. 141-145, may 1951, doi: 10.1111/j.1151-2916.1951.tb11623.x.
- [10] Y. Iqbal y W. E. Lee, «Fired Porcelain Microstructures Revisited», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 82, n.º 12, pp. 3584-3590, dic. 2004, doi: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb02282.x.
- [11] «Ceramic Manufacturing Industry August 2007».
- [12] «Materiales y materias primas».
- [13] P. W. Olupot, S. Jonsson, y J. K. Byaruhanga, «Study of Glazes and Their Effects on Properties of Triaxial Electrical Porcelains from Ugandan Minerals», *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 19, n.º 8, pp. 1133-1142, nov. 2010, doi: 10.1007/s11665-010-9597-1.
- [14] «Estudio sobre la depuración de los lixiviados de vertederos de RSU con ceniza volantes».
- [15] K. F. Portella, A. Joukoski, R. Franck, y R. Derksen, «Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto: determinação do desempenho sob envelhecimento acelerado», *Cerâmica*, vol. 52, n.º 323, pp. 155-167, sep. 2006, doi: 10.1590/S0366-69132006000300008.
- [16] N. Xu *et al.*, «Preparation and properties of porous ceramic aggregates using electrical insulators waste», *Ceram. Int.*, vol. 41, n.º 4, pp. 5807-5811, may 2015, doi: 10.1016/j.ceramint.2015.01.009.

## Referencias Bibliográficas

- [17] K. Dana, S. Das, y S. K. Das, «Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin–quartz–feldspar system», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, n.º 10-11, pp. 3169-3175, sep. 2004, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.008.
- [18] Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú, S. Huaquisto Cáceres, G. Belizario Quispe, y Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú, «Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento», *Rev. Investig. Altoandinas - J. High Andean Res.*, vol. 20, n.º 2, pp. 255-234, abr. 2018, doi: 10.18271/ria.2018.366.
- [19] J. Sánchez-Molina, F. A. Corpas-Iglesias, y J. P. Rojas-Suárez, «Cenizas Volantes de Termoeléctrica como Materia Prima para la Fabricación de Materiales Cerámicos de Construcción: Efecto de la Temperatura de Cocción sobre el Material», *Inf. Tecnológica*, vol. 30, n.º 1, pp. 285-298, feb. 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000100285.
- [20] M. E. Gómez-Pantoja, «XXIV Reunión de la Sociedad Española de Arcillas 2015», p. 2, 2015.
- [21] «Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes».
- [22] «CENIZAS VOLANTES DE CARBON Y CENIZAS DE HOGAR».
- [23] S. S. Musil y W. M. Kriven, «In Situ Mechanical Properties of Chamotte Particulate Reinforced, Potassium Geopolymer», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 97, n.º 3, pp. 907-915, mar. 2014, doi: 10.1111/jace.12736.
- [24] «Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X». <https://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectrometra-de-fluorescencia-de-rayos-x> (accedido jun. 08, 2021).

## Referencias Bibliográficas

- [25] «Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera».
- [26] K. L. Roa Bohórquez, R. A. Paredes Roa, y L. Á. Lara González, «Aplicación de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y cenizas volantes como refuerzo en la matriz de unidades cerámicas macizas», *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 17, n.º 32, pp. 35-49, 2018, doi: 10.22395/rium.v17n32a2.
- [27] P. W. Olupot, S. Jonsson, y J. K. Byaruhanga, «Development and characterisation of triaxial electrical porcelains from Ugandan ceramic minerals», *Ceram. Int.*, vol. 36, n.º 4, pp. 1455-1461, may 2010, doi: 10.1016/j.ceramint.2010.02.006.
- [28] B. Ngayakamo y S. E. Park, «Effect of firing temperature on triaxial electrical porcelain properties made from Tanzania locally sourced ceramic raw materials», *Epitoanyag - J. Silic. Based Compos. Mater.*, vol. 70, n.º 4, pp. 106-109, 2018, doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.19.
- [29] K. Dana, S. Das, y S. K. Das, «Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin–quartz–feldspar system», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, n.º 10-11, pp. 3169-3175, sep. 2004, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.008.
- [30] P. W. Olupot, S. Jonsson, y J. K. Byaruhanga, «Effects of the Sintering Process on Properties of Triaxial Electrical Porcelain from Ugandan Ceramic Minerals», vol. 7, n.º 5, p. 7, 2013.
- [31] «El empleo del cuarzo en las composiciones de cerámica blanca».



## Referencias Bibliográficas

- [32] Mr. P. Ash y Dr. K. C.L, «Enhancing the Performance Consistency of Porcelain Insulators by Understanding Failure Modes: Case Study Approach», *IJIREEICE*, vol. 5, n.º 2, pp. 1-14, feb. 2017, doi: 10.17148/IJIREEICE.2017.5201.
- [33] V. Tejada y D. Plée, «ESTUDIO DE FORMULACIONES CERÁMICAS PARA AISLADORES ELÉCTRICOS», *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 82, n.º 1, pp. 72-86, mar. 2016, doi: 10.37761/rsqp.v82i1.53.
- [34] A. Merga, H. C. A. Murthy, E. Amare, K. Ahmed, y E. Bekele, «Fabrication of electrical porcelain insulator from ceramic raw materials of Oromia region, Ethiopia», *Heliyon*, vol. 5, n.º 8, p. e02327, ago. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02327.
- [35] C. A. Harper, *Handbook of ceramics, glasses, and diamonds*. 2001. Accedido: jun. 01, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10152898>
- [36] R. H. Piva, P. Vilarinho, M. R. Morelli, M. A. Fiori, y O. R. K. Montedo, «Influence of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on the dielectric behavior of aluminous porcelain insulators», *Ceram. Int.*, vol. 39, n.º 7, pp. 7323-7330, sep. 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.02.071.
- [37] F. Cardarelli, *Materials Handbook*, 2nd ed. London: Springer London, 2008. doi: 10.1007/978-1-84628-669-8.
- [38] L. Mattyasovszky-Zsolnay, «Mechanical Strength of Porcelain», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 40, n.º 9, pp. 299-306, sep. 1957, doi: 10.1111/j.1151-2916.1957.tb12626.x.

## Referencias Bibliográficas

- [39] «MÉTODO DE FABRICACIÓN DE UN PRODUCTO CERÁMICO A PARTIR DE CENIZAS VOLANTES COMO MATERIA PRIMA».
- [40] A. G. Verbuch y J. M. G. Alvarez, «Microestructura de una porcelana triaxial», p. 24.
- [41] Y. Iqbal y W. E. Lee, «Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 83, n.º 12, pp. 3121-3127, dic. 2000, doi: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01692.x.
- [42] J. Martín-Márquez, J. Ma. Rincón, y M. Romero, «Mullite development on firing in porcelain stoneware bodies», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 30, n.º 7, pp. 1599-1607, may 2010, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.002.
- [43] W. M. Carty y U. Senapati, «Porcelain? Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 81, n.º 1, pp. 3-20, ene. 1998, doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02290.x.
- [44] S. F. Muro y J. L. Ferrando, «Porcelanas electrotécnicas de alta resistencia mecánica t'íí'^^», p. 6.
- [45] S. L. Correia, A. P. N. Oliveira, D. Hotza, y A. M. Segadães, «Properties of Triaxial Porcelain Bodies: Interpretation of Statistical Modeling», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, n.º 11, pp. 3356-3365, nov. 2006, doi: 10.1111/j.1551-2916.2006.01245.x.
- [46] F. H. Riddle, «The production of porcelain for electrical insulation — I», *J. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 42, n.º 4, pp. 343-346, abr. 1923, doi: 10.1109/JoAIEE.1923.6593323.

## Referencias Bibliográficas

- [47] S. R. Bragança y C. P. Bergmann, «Traditional and glass powder porcelain: Technical and microstructure analysis», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, n.º 8, pp. 2383-2388, jul. 2004, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.08.003.

## 8. Índice de Figuras

<b>Fig.1.</b> Aisladores eléctricos cerámicos. ....	8
<b>Fig. 2.</b> Propiedades de la porcelana en función de las materias primas [5]. ....	14
<b>Fig. 3.</b> Diagrama del proceso de manufactura de aisladores eléctricos de porcelana [12]. ....	21
<b>Fig. 4.</b> Mezclador de polvos cerámicos. ....	22
<b>Fig. 5.</b> Filtros-prensa en la industria cerámica. ....	23
<b>Fig. 6.</b> Prensa hidráulica uniaxial para conformar probetas cerámicas escala laboratorio. ....	24
<b>Fig. 7.</b> Proceso de sinterizado [6]. ....	26
<b>Fig. 8.</b> Patrón de difracción de DRX del cuarzo. ....	40
<b>Fig. 9.</b> Patrón de difracción de DRX de la arcilla. ....	41
<b>Fig. 10.</b> Patrón de difracción de DRX del caolín. ....	42
<b>Fig. 11.</b> Patrón de difracción de DRX del feldespato. ....	42
<b>Fig. 12.</b> Patrón de difracción de DRX de la ceniza volante. ....	43
<b>Fig. 13.</b> Patrón de difracción de DRX de la chamota. ....	43

## Índice de Figuras

<b>Fig. 14.</b> Microscopio electrónico de barrido que se utilizó.....	44
<b>Fig. 15.</b> a) Prensa hidráulica de 20 toneladas utilizada para el conformado de las probetas porcelánicas, b) Dado utilizado para las probetas porcelánicas. ....	47
<b>Fig. 16.</b> Probetas experimentales de porcelana eléctrica de forma cilíndricas obtenidas después del prensado uniaxial. ....	48
<b>Fig. 17.</b> Esquema general para el procedimiento de obtención de las probetas porcelánicas eléctricas experimentales.....	49
<b>Fig. 18.</b> Pesaje de las probetas (peso seco y peso húmedo).....	50
<b>Fig. 20.</b> Equipo utilizado para la realización de los ensayos de compresión en frío (CCS). ....	53
<b>Fig. 21.</b> Equipo microidentador utilizado para medir la microdureza Vickers. ....	55
<b>Fig. 22.</b> Equipo utilizado para en análisis microestructural. ....	56
<b>Fig. 23.</b> Pulidora utilizado para pulir muestras cerámicas. ....	57
<b>Fig. 24.</b> Equipo utilizado para el análisis de difracción de rayos-X de las probetas. ....	58
<b>Fig. 25</b> Variación de la densidad y porosidad aparente de la formulación de sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (CV). ....	62
<b>Fig. 26.</b> Variación de la densidad y porosidad aparente de las formulaciones de sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv).....	63

## Índice de Figuras

<b>Fig. 27.</b> Comportamiento de la porosidad y absorción de humedad de la formulación base con sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv). .....	64
<b>Fig. 28.</b> Comportamiento de la porosidad y la absorción de humedad de la formulación base con sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv). .....	65
<b>Fig. 29.</b> Gráfico de resistencia a la compresión en frío sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv). .....	67
<b>Fig. 30.</b> Gráfico de resistencia a la compresión en frío sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv). .....	69
<b>Fig. 31.</b> Huella característica del ensayo de microdureza Vickers. ....	70
<b>Fig. 32.</b> Gráfico de microdureza Vickers para la formulación de sustitución de cuarzo (Cz) y feldespato (F) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv). .....	72
<b>Fig. 33.</b> Gráfico de microdureza Vickers para la formulación de sustitución de cuarzo (Cz) por chamota (Ch) y ceniza volante (Cv). .....	72
<b>Fig. 34.</b> Difractogramas comparativos de las formulaciones de sustitución de cuarzo y feldespato por chamota y ceniza volante después de ser sinterizadas. ....	73
<b>Fig. 35.</b> Difractogramas comparativos de las formulaciones de sustitución de cuarzo por chamota y ceniza volante después de ser sinterizadas. ....	74

## Índice de Figuras

- Fig. 36.** Evolución microestructural de las formulaciones de porcelana eléctrica sinterizadas. A, formulación base o de control. B-E, formulaciones con 5, 8, 12 y 15% en pesos de sustituciones de cuarzo y feldespato por ceniza volante y chamota, respectivamente. F-I, formulaciones con 5, 8, 12 y 15% en pesos de sustituciones de cuarzo por ceniza volante y chamota, respectivamente. .... 76
- Fig. 37.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación base (A) a 500X y 2500X, posterior al proceso de sinterizado. El número 1 indicando granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y el número 2, la fase mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ). .... 77
- Fig. 38.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación de adición de 5 % de ceniza volante y chamota (B) a 100X, posterior al proceso de sinterizado, 1 grano de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), 2 fase vítrea, 3 impurezas..... 78
- Fig. 39.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación C a 250X, posterior al proceso de sinterizado. 1 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), 2 fase vítrea..... 79
- Fig. 40.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación D a 250X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y el número indica 2 la fase vítrea. .... 80
- Fig. 41.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación E a 100X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), el número indica 2 la fase vítrea y el número 3 indica impureza de oxido de hierro. .... 81
- Fig. 42.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación F a 100X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 porosidad, el número 2 la fase cuarzo. .... 82

## Índice de Figuras

**Fig. 43.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación G a 100X, posterior al proceso de sinterizado. El numero indica 1 porosidad, el número 2 la fase vítrea.

..... 83

**Fig. 44.** Microestructura y EDAX de la muestra de la formulación H a 250X, posterior al proceso de sinterizado. El número indica 1 la fase vítrea, el número indica 2 granos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). .....

83

**Fig. 45.** Micrografías de la formulación de sustitución de cuarzo por ceniza volante y chamota en un 15 % en peso (I), 1 grano de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), 2 fase mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ). .....

84



### 9. Índice de Tablas

Tabla 1. Composición y clasificación de las porcelanas eléctricas .....	9
Tabla 2 Propiedades generales de la porcelana eléctrica.....	14
Tabla 3 Valores de resistencia mecánica para porcelana triaxial de grado eléctrica [5].....	16
Tabla 4. Valores dieléctricos característicos para los diferentes tipos de porcelana de grado eléctrico [6].....	18
Tabla 5. Especificaciones de las cenizas volantes según la norma ASTM C168 [19]. .....	32
Tabla 6 Composición química de las materias primas. ....	39
Tabla 7. Composiciones de las formulaciones experimentales estudiadas (% en peso).....	45
Tabla 8 Valores promedios de densidad y porosidad aparente de las probetas. ....	61
Tabla 9. Valores promedios de porosidad y absorción de agua de las probetas. ....	64
Tabla 10 Valores promedios de resistencia a la compresión en frío de las probetas. ....	66
Tabla 11 Valores promedios de microdureza.....	70